J. SURUGUE

TECHNIQUES GÉNÉRALES DU LABORATOIRE DE PHYSIQUE

*

(2e édition, revue et complétée)

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Copyright by Centre National de la Recherche Scientifique
Paris 1955

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

TECHNIQUES GÉNÉRALES DU LABORATOIRE DE PHYSIQUE

Publiées sous la direction de

J. SURUGUE

Professeur à l'École Supérieure de Physique et Chimie
Directeur Scientifique à l'ONERA

Préface de

F. JOLIOT-CURIE
Membre de l'Institut
Prix Nobel

Volume I

(2e édition, revue et complétée)

Renseignements et Vente : Service des Publications du CNRS
13, Quai Anatole-France, Paris (7e)

1955

SOMMAIRE

Pages

I - Principes généraux de construction des appareils scientifiques

H. GONDET 1

II - Principales opérations de soufflage de verre au laboratoire

Ch. AMATE 67

III - Technique du vide

J. SURUGUE 87

IV - Réalisation et mesure des hautes températures

G. RIBAUD et A. MOUTET 133

V - Techniques générales du laboratoire d'optique

A. ARNULF 231

VI - Sources de lumière et filtres

G. DUPUY 299

VII - Cellules photoélectriques

A. LALLEMAND et M. MUNSCH 381

VIII - Enregistrement

H. GONDET 417

IX - Régulation et redressement des tensions et courants

M. DEMONTVIGNIER 473

X - Amplification et transformation des signaux. Technique des circuits électriques et des tubes à vide

R. HUCHET 533

PRÉFACE

L'ouvrage de M. SURUGUE, présenté par le Centre National de la Recherche Scientifique en 1947, a rencontré auprès du public des travailleurs de laboratoire un légitime succès. Ceux-ci ont trouvé en effet des renseignements d'une extrême variété, fournis par des hommes ayant appris eux-mêmes par la pratique du travail expérimental à juger de la valeur ou de la commodité des méthodes ou des appareillages publiés dans la littérature scientifique et technique et pouvant ainsi faire part d'observations et de remarques essentiellement pratiques.

Le domaine couvert par les différentes techniques exposées a peut-être pu paraitre un peu vaste, puisqu'il s'étend du travail du verre et des métaux à l'emploi des Rayons X, des cellules photoélectriques aux matières plastiques. Je pense néanmoins qu'il était utile de donner aux chercheurs français une clé permettant d'ouvrir de nombreuses portes et faisant précisément connaitre à chaque spécialiste les possibilités offertes par les disciplines qu'il connait peu ou mal. Ceci est certainement une des meilleures raisons de la diffusion des "TECHNIQUES GÉNÉRALES DU LABORATOIRE DE PHYSIQUE" dans les laboratoires publics ou privés.

L'édition actuelle a conservé la structure générale de la première, chacun des chapitres ayant reçu les compléments et modifications imposés par l'évolution des techniques, à vrai dire assez modestes pour certains, beaucoup plus profonds pour d'autres, par exemple pour les procédés d'enregistrement ou la mesure des températures rapidement variables dans les flammes.

Un nouveau chapitre a été consacré à la technique des circuits électriques comportant des tubes à vide. Cette technique aux innombrables applications a fait l'objet d'ouvrages très étendus et très nombreux, mais l'exposé relativement réduit qui en est fait ne peut que faciliter grandement la tâche des physiciens appelés à s'en servir.

Il est hors de doute que cette seconde édition remplacera rapidement dans les laboratoires et les bibliothèques les volumes déjà fatigués par l'usage constant qu'on en fait de l'ouvrage de M. SURUGUE, à qui nous devons être reconnaissants des efforts qu'il a fournis pour mener à bien cette tâche très utile.

Frédéric JOLIOT-CURIE

Professeur au Collège de France
Prix Nobel

AVANT-PROPOS

Depuis la parution de cet ouvrage, le rôle de la technique dans le travail de recherche n'a fait que croître, et l'importance des moyens matériels nécessaires à sa progression, leur maniement et même leur entretien conduisent à l'emploi d'un personnel technicien spécialisé toujours plus nombreux.

Ceci n'empêche pas, bien au contraire, les travailleurs des laboratoires d'avoir souvent besoin d'un guide de caractère essentiellement pratique qui leur permette ou facilite l'usage d'un certain nombre de techniques souvent indispensables et toujours utiles au développement de leur travail.

Si la littérature s'est enrichie de quelques traités spécialisés fort précieux, la demande d'un ouvrage tel que celui qu'a publié le C.N.R.S. ne s'est pas amoindrie et justifie cette seconde édition dont nous espérons qu'elle aura le même succès que la première.

Nous avons conservé dans celle-ci les rubriques figurant dans la précédente, en y ajoutant toutefois un chapitre sur l'utilisation des tubes à vide dans l'amplification et la transformation des signaux. Cette addition correspond au développement considérable de ce qu'on a coutume d'appeler l'électronique et qui a fait introduire partout l'usage des tubes à vide pour résoudre élégamment un très grand nombre de problèmes.

Les autres chapitres ont subi des modifications plus ou moins profondes suivant l'évolution du sujet correspondant, et suivant aussi les observations qu'ont bien voulu nous faire certains lecteurs, ce dont nous les remercions.

J. SURUGUE

PREMIER CHAPITRE

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE CONSTRUCTION DES APPAREILS SCIENTIFIQUES

par

H. GONDET

Directeur général des Laboratoires du C.N.R.S. de Bellevue

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE CONSTRUCTION DES APPAREILS SCIENTIFIQUES

QUALITÉS D'UN INSTRUMENT 3

DEGRÉS DE LIBERTÉ D'UN SOLIDE 6

SOLIDE FIXE - DEGRÉ DE LIBERTÉ O 7

SOLIDE DOUÉ DE 1 DEGRÉ DE LIBERTÉ 9
- Mouvement de translation 10
- Mouvement de rotation 13
- Mouvement hélicoïdal 15

SYSTÈME A DEUX DEGRÉS DE LIBERTÉ 18

SYSTÈME A PLUS DE DEUX DEGRÉS DE LIBERTÉ 19

PROJET DE CONSTRUCTION D'UN INSTRUMENT DE PRÉCISION 20
- Modèles et pièces de fonderie 21
- Quelques principes de construction 27
- Entraînement des arbres 34
- Pièces tournantes 42

RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX 48
- Principales caractéristiques mécaniques de certains matériaux 48
- Déformations des pièces 50
- Travail des métaux 53

PREMIER CHAPITRE

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE CONSTRUCTION DES APPAREILS SCIENTIFIQUES

QUALITÉS D'UN INSTRUMENT

La question est souvent posée de savoir quelle est la qualité primordiale d'un instrument scientifique et plus particulièrement des appareils de mesure et d'observation : sensibilité (caractéristique fondamentale du pouvoir de résolution) ou fidélité. On place souvent en premier le facteur sensibilité; cependant il apparaît bien qu'en définitive c'est la fidélité qui constitue la qualité essentielle. Un appareil peut être très sensible; s'il est infidèle, toute confiance dans sa sensibilité disparaît. Par contre, il est bien rare qu'on ne puisse gagner sur la sensibilité d'un instrument dès que l'on est certain de sa fidélité, l'augmentation de sensibilité pouvant d'ailleurs être obtenue, dans la plupart des cas, par une amplification mécanique ou optique indépendante du principe même de fonctionnement de l'instrument.

La sensibilité vient donc en seconde ligne, puis la commodité d'emploi souvent liée à la simplicité. Enfin et surtout pour les appareils de mesure, de la simplicité d'emploi dérive le facteur d'efficacité, d'ordre plus industriel.

Nous laissons de côté le terme précision, pour l'ensemble de l'instrument, qui englobe simultanément la fidélité et la sensibilité. Nous ne l'emploierons que pour définir le degré d'ajustage d'organes élémentaires.

Rappelons toutefois que pour un instrument de mesure, on peut définir les termes "précision", "sensibilité" et "fidélité" de la manière suivante :

Précision : inverse de l'écart relatif maximum à craindre, provenant de différents facteurs, entre le résultat de la mesure d'une grandeur et sa valeur réelle. Elle est souvent indiquée par l'écart relatif correspondant à l'indication maximum de l'appareil.

Sensibilité : pente de la courbe de graduation. Cette caractéristique a une dimension, elle est variable chaque fois que la courbe de graduation n'est pas rectiligne.

Fidélité : qualité caractérisant le degré de concordance des indications fournies par un appareil pour des mesures faites dans

des conditions rigoureusement identiques. Il peut en dériver une notion d'erreur de fidélité.

Donc, un appareil quel qu'il soit, doit être fidèle; il doit reproduire les mêmes indications pour des causes identiques, dans des conditions d'emploi analogues en faisant autant que possible abstraction des conditions extérieures. Et qu'on ne s'y trompe pas, cette condition de fidélité est tout aussi importante pour un instrument destiné à faire une mesure accidentelle (instrument d'astronomie, par exemple) que pour un instrument destiné à effectuer des mesures par séries. Il faut, pour effectuer des observations ou des mesures avec confiance, être d'abord certain de la fidélité de son instrument.

Et c'est bien ce facteur qu'il est le plus difficile d'obtenir. Il dérive, la plupart du temps, non du principe de fonctionnement de l'appareil (sinon on peut l'éliminer d'emblée), mais de sa réalisation.

La construction d'un appareil scientifique doit donc être précise pour obtenir la fidélité nécessaire, mais cette précision doit résulter, non pas tant d'un usinage difficile, compliqué, que de l'emploi de mécanismes aussi simples que possible conçus d'après certaines règles résultant de principes géométriques et mécaniques qu'il est bon d'avoir toujours présents à l'esprit lors de l'étude d'un instrument.

Or, il est curieux de constater combien ces principes qui sont pourtant élémentaires paraissent mal connus, non seulement des travailleurs de laboratoire, mais également de bien des constructeurs. Et cet état de choses résulte d'une lacune dans l'enseignement des écoles techniques, qu'il serait pourtant facile de combler. Il existe des cours de mécanique rationnelle, de mécanique appliquée, des fluides, etc..., mais on passe délibérément sous silence la construction des instruments scientifiques qui sont à la base de tout travail efficace de laboratoire, et tel ingénieur pour qui la théorie des tourbillons n'a peut-être pas de secret, est incapable de dessiner correctement une pince ou un dispositif d'entraînement correct par vis et écrou.

Certes, il ne s'agit pas de réduire la physique à une simple question de support, mais il n'est pas inutile de savoir comment doit être exécuté un bon support pour faire de la physique. Quelques conférences faites au cours de séances de dessin ou de travaux pratiques suffiraient pour obtenir un résultat honorable.

Ces remarques ne sont pas neuves puisque Lord Kelvin, en 1879, dans son traité de Philosophie Naturelle, s'exprimait ainsi : "... Tels qu'ils sont construits, les instruments sont remarquables par l'ignorance des lois géométriques qui règlent leurs coulissements et leurs déplacements."

Ce qui est grave, c'est que bien souvent et en dépit d'exceptions heureusement de plus en plus nombreuses, ce qui fut énoncé en 1879 est encore vrai de nos jours.

Quelles sont donc les règles élémentaires, des règles de bon sens, qui doivent présider à l'étude et à la réalisation des instruments scientifiques ?

Elles furent énoncées par Maxwell en 1876 et en voici une traduction extraite des conférences du professeur A. Pollard, faite devant la Royal Society of Arts, en 1922 et parue dans les numéros 1, 5 et 8 de la Revue d'Optique de 1923.

"Il existe un certain nombre de règles, communes à tous les "instruments, qui doivent tout d'abord retenir notre attention lors- "que nous établissons un projet d'appareil. Le principe fondamen- "tal est que la construction de l'instrument doit être adaptée à son "emploi; en particulier, il importe que les parties qui doivent "être fixes ne puissent pas se déplacer; que celles dont la fonc- "tion est mobile n'adhèrent pas trop fort et que celles qui doivent "être soumises à l'observation ne soient pas masquées ni placées "dans l'obscurité; de plus, les pièces qui doivent avoir une forme "exactement déterminée ne devront pas être susceptibles de se "déformer par gauchissement, tension ou usure.

"Toute pièce d'un instrument a une fonction qui peut être soit "fixe, soit mobile, et qui définit sa forme de manière précise. "Elle est soumise à l'action de son propre poids et à celle d'au- "tres forces, mais il importe qu'elle n'ait pas à supporter de for- "ces inutiles, qui ne peuvent que diminuer sa résistance, ou (ce "qui serait plus préjudiciable encore au point de vue scientifique) "modifier sa forme et causer ainsi, par leur intervention impré- "vue, des perturbations et des confusions dans les mesures à "effectuer.

"Nous aurons donc à étudier les méthodes permettant de sous- "traire à toutes forces inutiles les pièces constitutives d'un ins- "trument, d'assurer une position déterminée aux parties fixes, "tout en laissant aux parties mobiles un mouvement doux, sans "heurts et sans jeux.

"Nous y parviendrons en ne perdant pas de vue ce principe "bien connu en cinématique :

« Tout corps rigide possède six degrés de liberté.

"Un corps rigide est un corps dont la forme est invariable; "les parties constitutives de nos instruments sont solides mais "non rigides; elles sont susceptibles de se déformer sous l'ac- "tion de forces; de telles déformations ne sont pas utiles en gé- "néral, sauf dans certains cas spéciaux, par exemple pour les "ressorts.

"Donc, lorsqu'un solide se trouve contraint de plus de six "manières différentes, il est soumis à des forces intérieures, "et peut subir des tensions ou des torsions qui, en général, ne "seront décelées qu'au prix de mesures microscopiques tout à "fait minutieuses.

"Dans certains instruments destinés à des manipulations "plus ou moins brutales, il peut être nécessaire d'assurer la "fixité rigoureuse de certaines pièces, quitte à les soumettre "à certaines tensions ou contractions; par contre, dans les ap- "pareils de précision, il importe que les supports et logements "de chacune des pièces soient minutieusement étudiés, tant au "point de vue de leur nombre qu'au point de vue de leur position."

DEGRÉS DE LIBERTÉ D'UN SOLIDE

Un point sans dimension ne peut subir de rotation et ne possède donc que les 3 degrés qui sont ses coordonnées prises d'ailleurs par rapport à un système d'axes quelconque.

Mais un corps solide indéformable possède 6 degrés de liberté qui peuvent être 3 translations quelconques et 3 rotations. Le paramètre correspondant à un de ses degrés de liberté étant fixé (ce qui assure une liaison) il en résulte une diminution de possibilité de mouvement du corps.

Pour fixer la position d'un solide dans l'espace, il est donc nécessaire d'avoir recours à 6 liaisons indépendantes. L'existence d'un nombre de liaisons indépendantes supérieur à 6 entraîne inévitablement l'existence de contraintes conduisant à des déformations qui peuvent être défavorables et notamment nuire à la fidélité.

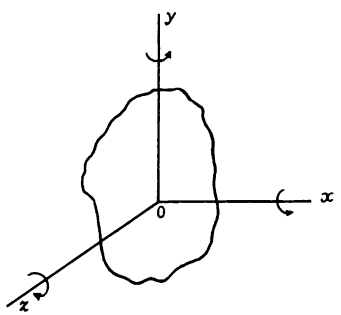


Fig. 1.- Solide non lié.

Considérons le mouvement le plus général d'un corps pouvant se décomposer en 3 rotations autour des axes ox, oy, oz et en 3 translations le long de ces axes (fig. 1).

Si l'on fixe les coordonnées d'un point du corps, on supprime les 3 mouvements de translation en ne conservant possibles que ceux de rotation. Le nombre des degrés de liberté est passé de 6 à 3. Les 3 degrés de liberté perdus sont remplacés par 3 liaisons. Si l'on fixe de même les coordonnées d'un deuxième point du corps, celui-ci perd 2 nouveaux degrés de liberté et reste assujetti à tourner autour de la droite reliant les 3 points définis. Si l'on fixe un troisième point indépendant de cet axe, le corps est voué à l'immobilité (démonstration par les coordonnées cartésiennes).

Il en sera exactement de même si l'on fait reposer le corps par 6 points convenablement choisis sur 6 surfaces convexes appartenant au support. En effet, partons du corps immobilisé en un point (3 degrés de liberté) et permettons à ce point de se déplacer dans toutes les directions sur une surface fixe, le corps recouvre 2 degrés de liberté, il en possède 5 en tout. Si l'on impose à un nouveau point de rester en contact avec une nouvelle surface, il y a perte d'un nouveau degré de liberté et, par extension, on retrouve l'immobilité en contraignant 6 points du corps à rester en contact avec 6 surfaces (démonstration par les coordonnées généralisées).

Il y a lieu de bien différencier les points effectifs de contact qui seuls déterminent le nombre de degrés de liberté restant au corps, des appuis qui servent à assurer le contact, l'appui pouvant être la pesanteur, un ressort ou une vis quelconque, dont le contact ne doit pas être compté pour déterminer le nombre de

degrés de liberté. Les premiers restent fixes, les autres sont mobiles ou mal définis quand les liaisons de contact sont supprimées.

Pratiquement, d'autre part, les points de contact sont toujours des surfaces de contact plus ou moins étendues, mais il y a intérêt pour définir exactement la position du corps, à réduire au minimum la surface de ces zones de contact, compte tenu du coefficient d'élasticité, de celui de frottement, de l'écrasement, etc.

Envisageons maintenant les applications de ces principes aux solides possédant 0, 1, 2, 3 degrés de liberté.

SOLIDE FIXE - DEGRÉ DE LIBERTÉ 0

Le solide ne doit présenter sur son support qu'une seule position parfaitement définie. Le nombre des points d'appui doit donc être de 6. Ceux-ci peuvent être choisis de bien des façons, mais il est important de les disposer de manière que la suppression d'un de ces points d'appui procure un degré de liberté au solide, ce qui implique, entre autre, que les normales à 3 surfaces différentes ne doivent se trouver, ni dans un même plan, ni passer par un même point, ni être parallèles.

Prenons, par exemple, l'emboiture d'une plateforme de pièce optique (miroir, prisme quelconque) sur un support fixe.

La plateforme mobile présente 3 pieds (ou 3 vis sans jeu) à bouts arrondis qui doivent porter sur le socle par 6 points de contact.

Il existe deux manières classiques d'assurer ces 6 points d'appui :

On peut utiliser 3 cannelures en V fraisées à 120° dans le support. Mais si l'on considère que le plan tangent à la surface d'un support doit, de préférence, être normal à la direction du mouvement possible (ce qui définit au mieux les différents degrés de liberté) il est préférable d'employer l'emboiture trou-trait-plan de Kelvin.

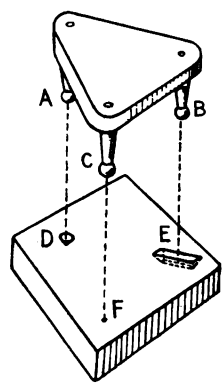


Fig. 2.- Solide sans degré de liberté. Emboiture trou-trait-plan de Lord Kelvin.

Dans cette emboiture, les 3 pieds A.B.C. à bouts arrondis de la plateforme reposent respectivement dans un trou D théoriquement triédrique (et pratiquement cônique sans ovalisation), dans une rainure en V fraisée sensiblement, en E, dans la direction du trou, et sur un plan F. (fig. 2).

Le trou D supprime 3 degrés de liberté; il n'y a plus de translation possible; le V supprime 2 degrés de liberté en rotation et l'appui sur le plan en F supprime le sixième degré de liberté (rotation du trépied autour de l'axe D E).

Il faut noter que le trou D doit être parfaitement cônique ou de forme sensiblement triédrique, de manière à assurer 3 points

de contact avec le pied arrondi. Il ne doit pas être ovalisé, ce qui n'assurerait la suppression que de 2 degrés de liberté au lieu de 3. Ce trou peut encore être cônique et le pied A limé en forme de pyramide triangulaire.

Cette emboîture permet de définir la position de la plateforme avec une précision remarquable, son appui pouvant être assuré, soit par la pesanteur, soit par un système de ressorts convenablement disposés.

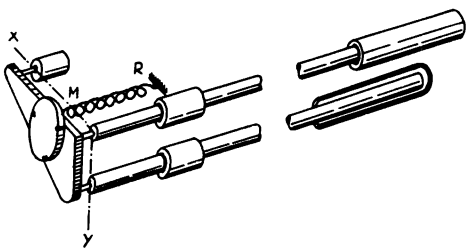


Fig. 3.- Schéma du diatomètre différentiel à enregistrement photographique de Chevenard. Trépied optique pivotant sur 3 pointes à angle droit mobile autour de 2 axes rectangulaires OX OY emboîture trou - trait - plan.

Les pieds de contact peuvent d'ailleurs être placés, non pas aux sommets d'un triangle équilatéral, mais par exemple aux sommets d'un triangle rectangle, ce qui donne une grande commodité de réglage de la plateforme suivant 2 axes rectangulaires. (fig. 3).

Une réalisation particulièrement heureuse de ce montage, se trouve dans le dilatomètre différentiel de Chevenard, dans lequel la plateforme servant de support à un miroir possède 2 mouvements rectangulaires permettant l'inscription d'une courbe représentant la différence de dilatation d'un échantillon et d'une tige étalon en fonction de la température.

La combinaison de 2 rotations s'effectue grâce à l'emboîture trou-trait-plan, avec une fidélité remarquable.

Au sujet du trou cônique servant de crapaudine, il faut noter qu'il ne doit jamais recevoir un pied cônique terminé en pointe, ce qui, pratiquement, ne fournirait dans le fond de la crapaudine qu'un seul point de contact et ne supprimerait donc qu'un seul degré de liberté au lieu de 3.

L'extrémité de la butée doit donc être terminée, soit par une portion hémisphérique reposant dans le trou cônique (ou mieux triédrique), soit par une pyramide triangulaire s'appuyant sur le bord arrondi d'un trou cylindrique.

La fixation directe ou inversée d'une pièce au moyen de l'emboîture de Kelvin, n'est pas seulement applicable aux pièces de petites dimensions pratiquement indéformables. Elle peut être étendue aux pièces de grandes dimensions susceptibles de se déformer sous la seule influence de leur poids. Ce sera le cas d'un miroir de télescope, par exemple. Comme il est nécessaire de maintenir ces pièces sur un très grand nombre de points tout en conservant les principes de fixation géométrique, on multiplie le nombre des emboîtures de Kelvin de la manière suivante :

Un premier support fixe triangulaire, de dimensions légèrement inférieures à celles de la pièce à maintenir, présente 3 pieds

terminés par des parties hémisphériques formant rotules. Sur chacune de celles-ci vient s'emboîter une crapaudine centrée sur un trépied de plus petites dimensions qui, grâce à cette articulation par rotule, peut s'orienter dans un angle solide d'ouverture notable.

Les pieds de ces derniers supports peuvent alors reposer dans 3 systèmes d'emboîtement trou - trait-plan solidaires de la pièce à fixer.

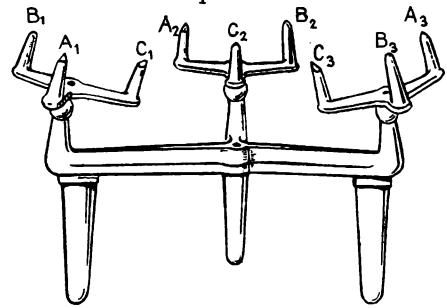


Fig. 4.- Support à 9 touches assurant le maintien par un montage géomètrique d'une pièce de grande dimension (miroir). Il est constitué par 3 rotules supportant chacune un trépied à emboiture de Kelvin (montage de Dunoyer).

C'est Lord Rose qui, en 1845, utilisa un dispositif de supports de ce type, inventé par Thomas Grubb, présentant, non pas 1, mais 3 étages successifs avec 81 points de contact, mais l'emboîtement terminal de chacun des éléments n'était évidemment pas celui de Lord Kelvin.

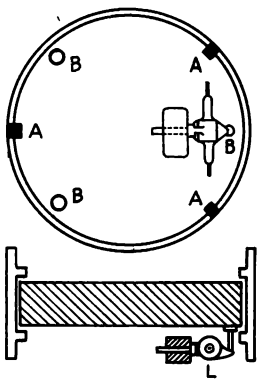


Fig. 5.- Barillet support de miroir de télescope. Le miroir est soutenu en plusieurs points grâce à des contrepoids dont l'efficacité dépend de l'angle que fait l'axe optique du télescope avec la verticale du lieu (Danjon et Couder).

Une telle superposition de supports ne présente d'ailleurs pas une stabilité suffisante et le dispositif mentionné ci-dessus est correct mais s'arrête à 9 touches.

Signalons le montage actuellement utilisé pour soutenir les miroirs de télescopes dans leur barillet. Le miroir repose sur 3 points fixes dorsaux près de la périphérie. Il est, d'autre part, soulagé en un nombre de points variables suivant ces dimensions au moyen de systèmes articulés à contrepoids tels que celui représenté en L (fig. 5).

La pression sur ces points d'appui est réglable suivant la position du contrepoids et proportionnelle au cosinus de l'angle que fait l'axe optique du télescope avec la verticale du lieu. Elle varie donc comme la composante nuisible du poids du miroir (voir pour plus de détails "Lunettes et Télescopes" de A. Danjon et A. Couder).

SOLIDE DOUÉ DE I DEGRÉ DE LIBERTÉ

Pour donner à un solide un seul degré de liberté, il faut le faire reposer par 5 points efficaces sur le support fixe.

D'une manière générale, on peut dire que le mouvement d'un corps solide à un seul degré de liberté est à chaque instant tangent

à un mouvement hélicoïdal résultant d'un mouvement de rotation autour d'un axe, et d'un mouvement de translation suivant cet axe. Cet axe instantané de rotation et de glissement est le même à chaque instant pour tous les points du solide, mais peut se déplacer continuellement.

On est amené à envisager de ce fait, soit un mouvement de rotation pure, soit un mouvement de translation, soit un mouvement hélicoïdal de vis dans son écrou (rapport constant entre la rotation et la translation). Ces mouvements simples ne sont pas les seuls possibles, mais sont les seuls importants.

Dans le cas du trépied de Kelvin, remplaçons le trou D par une rainure en V fraisée dans le prolongement de celle qui existait; le solide ne repose plus que sur 5 points et possède un mouvement de translation sans jeu. Supprimons au contraire la rainure initiale en V en conservant le trou D, il existe encore 5 points de contact mais le seul mouvement possible est une rotation.

MOUVEMENT DE TRANSLATION

On peut théoriquement le faire dériver directement du rejet à l'infini de l'axe instantané de rotation.

Ce mouvement peut être obtenu de bien des manières :

1° Par une rainure et un guide plan (trépied de Kelvin à 2 rainures en prolongement).

La rainure en V doit être fraisée dans un métal se déformant peu (et même soumis à un recuit ou à un traitement thermique convenable) comme la fonte, par exemple. La surface de glissement doit être usinée bien parallèlement aux génératrices du V.

Si la pression de la pièce coulissante n'est pas trop forte (chariot léger d'un banc d'optique), celle-ci présente simplement 3 pieds arrondis polis (ou billes soudées) dont 2 reposent dans la rainure (4 points de contact) et un sur le plan, cinquième point de contact.

La pression des surfaces d'appui est assurée par la pesanteur ou par ressorts.

Si le poids du chariot est assez important, on remplacera les pieds arrondis par des cylindres de faible longueur (10 à 20 mm. dans l'axe du V, de manière à mieux répartir les pressions).

Enfin, dans le cas ou le chariot est lourd, il devient indispensable d'usiner de véritables surfaces d'appui (V d'un côté, plan de l'autre), mais la règle des 5 points n'est plus observée et l'usinage doit être effectué très minutieusement, par fraisage et grattage, de manière à assurer un appui uniforme de tous les points de contact (banc de tour).

Ce dernier montage est donc à éviter pour des appareils relativement légers.

Dans le cas où l'on désire un mouvement extrêmement doux du chariot, on peut encore fraiser un V en saillie sur le socle, en remplacement de la rainure et munir la partie correspondante du

chariot, non plus de simples touches, mais de 2 galets tournants, bicônes, reposant sur le V et d'un galet cylindrique reposant sur le plan. Les axes de rotation de ces roulettes doivent naturellement présenter le minimum de jeu. Toutefois, ce dernier montage est plus facile à réaliser en utilisant le deuxième procédé de guidage par barres cylindriques calibrées.

Enfin, le montage par rainure et guide plan remplace très avantageusement celui à queue d'aronde qui nécessite un ajustage très précis et qui n'est à conseiller que si l'on veut obtenir une excellente fixation, après réglage de la partie coulissante sur la partie fixe, et qui se recommande toutefois également dans le cas d'usinage de petites pièces (fentes de spectroscopes, par exemple).

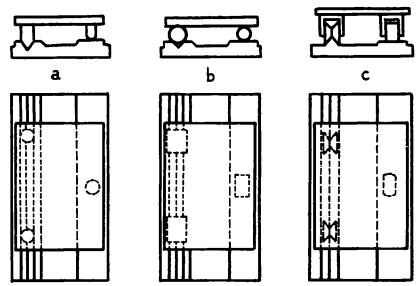


Fig. 6.- Mouvements de translation : Solides à 1 degré de liberté.
a) 1 rainure et 2 pieds; 1 plan et 1 pied
b) 1 rainure et 2 cylindres ; 1 plan et 1 galet cylindrique.
c) 1 V, 2 galets bicônes; 1 galet cylindrique.

2° Guidage par barres cylindriques calibrées.

Il est particulièrement indiqué comme montage de laboratoire, car il ne nécessite pas d'usinage précis à la fraiseuse, de très bonnes barres cylindriques en acier Stub pouvant être trouvées dans le commerce. Employé à différentes reprises, ce montage a été remis en honneur il y a quelques années par M. Arnulf (voir notamment : "Mesures des rayons de courbure par auto-collimation" de M. Arnulf, Revue d'Optique, n° 1 et 2, 1931).

Toutefois, ce dispositif doit être effectué avec beaucoup de soin. On fait généralement reposer les barres cylindriques, soit sur des extrémités de vis, soit sur des cônes dont la position est réglable en hauteur. La barre est, d'autre part, maintenue à chaque extrémité par une bride et soutenue en différents points de sa longueur, s'il est nécessaire, pour éviter des flexions gênantes. Il ne faut pas hésiter à employer des barres de gros diamètre et on doit s'assurer, par le calcul, des valeurs des flèches pour un poids de chariot donné.

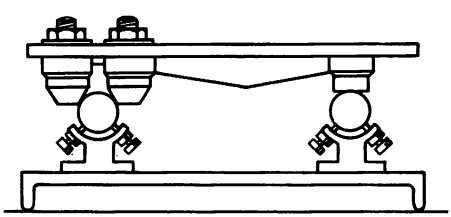


Fig. 7.- Chariot guidé sur 2 barres d'acier Stub bien calibrées.
Guidage assuré par 2 paires de cônes sur une barre et un plan sur l'autre.
Bien vérifier le parallèlisme des 2 barres - éviter leur flexion (montage Arnulf)

La difficulté réside dans la nécessité d'amener les génératrices des deux barres à être bien parallèles, principalement horizontalement, les deux barres pouvant d'ailleurs être décalées en hauteur l'une parallèlement par rapport à l'autre. Ce réglage du parallélisme peut s'effectuer, soit en utilisant un

niveau à bulle d'air très sensible, soit un comparateur, mais l'emploi de ce dernier instrument nécessite à son tour un rabotage ou un fraisage très correct du socle général de l'instrument servant de plan de référence.

Le chariot repose sur l'une des barres par quatre points déterminés par les contacts de cônes réglables fixés sous le chariot et sur l'autre barre par une touche plane (fig. 7).

Ce montage est facile à réaliser, mais, si l'on désire une excellente précision, il est indispensable de s'assurer que les barres sont bien droites et parfaitement cylindriques. Pratiquement il est souvent nécessaire de les rectifier.

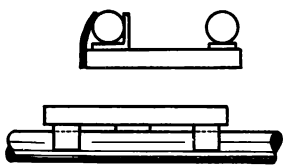


Fig. 8.- Guidage simple d'un chariot. 2 barres 2 équerres et 1 plan. 2 ressorts d'appui (montage Dunoyer).

M. Dunoyer emploie un montage très simple pour le chariot : les cônes sont remplacés par des équerres appliquées sur une des barres par un ressort (voir "Instruments et Géomètrie" par L. Dunoyer. Appareils de mesure et de Contrôle, vol. 11, 1943. Editions du Comité Général d'Organisation des Industries Mécaniques).

Si le chariot doit présenter un mouvement très doux, sans frottement, ou si le déplacement doit s'effectuer mécaniquement, d'un mouvement alternatif répété, il faut remplacer le frottement des cônes fixes sur les barres par le roulement de deux galets bicônes et d'un galet cylindrique montés sur axe sans jeu, car le frottement continuel aboutirait assez rapidement à une usure qui ne serait pas négligeable (fig. 9-a).

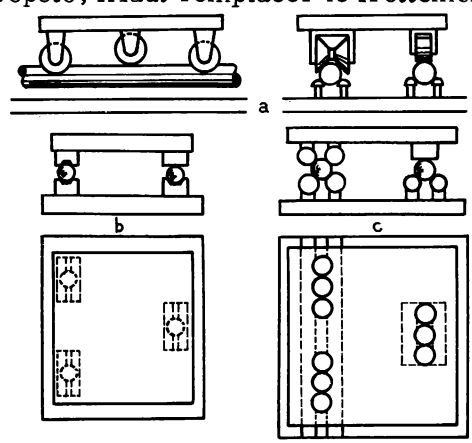


Fig. 9.- Montage de chariot à mouvement très doux.
a) Par galets bicônes et cylindriques sur barres calibrées.
b) Par rainure en V et billes pour mouvement alternatif de faible amplitude.
c) Pour mouvement analogue par billes multiples logées entre des barres calibrées.

Un autre montage de chariot extrèmement doux, utilisable pour des mouvements alternatifs de faible amplitude, peut encore être réalisé de la manière suivante :

Le socle présente deux rainures en V parallèles et le chariot une rainure en V et un plan, ces différentes pièces étant en acier trempé et poli. La liaison entre le chariot et le banc est assurée par trois grosses billes. On peut dans ces conditions donner au chariot un mouvement de va-et-vient pendant des jours, sans voir les billes changer l'emplacement de leur chemin de roulement (fig. 9-b).

Chacun des V peut encore être remplacé par deux barres

d'acier parallèles et si, d'autre part, le poids du chariot est assez important, on peut remplacer chaque bille par un jeu de plusieurs billes ayant exactement le même diamètre (fig. 9-c).

3° Montage de tube coulissant sur glissière à commande par crémaillère. (genre microscope).

Ce montage s'apparente aux précédents. Une manière assez simple de le réaliser consiste à faire porter le tube cylindrique mobile A sur quatre touches de quelques dizaines de millimètres carrés chacune, tournées au diamètre du tube et situées aux extrémités du berceau B. L'appui sur ces touches est assuré par une portion du tube C de petit diamètre formant ressort et glissant lui-même dans un trou cylindrique parallèle au berceau.

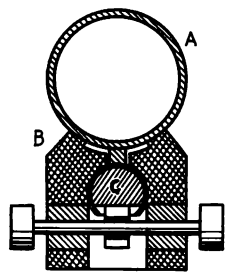


Fig. 10.- Coulissage de tube de microscope 4 touches et un guidage transversal empêchant la rotation.

Cette portion de tube est fixée en son centre par une languette coulissant dans une rainure et réalisant ainsi la cinquième touche de contact empêchant la rotation du tube principal. La crémaillère est logée à l'intérieur du tube C (fig. 10).

MOUVEMENT DE ROTATION

Rotation par trou-plan.- Le montage le plus simple, le plus géomètrique, donnant un mouvement de rotation d'une plateforme légère sur un support supposé plan, dérive directement du dispositif Kelvin.

Le support présente simplement un trou cylindrique définissant l'emplacement de l'axe de rotation et la plateforme repose sur le support par trois pieds (1 triédrique et 2 arrondis). Le pied triédrique se loge dans le trou central et les deux pieds arrondis reposent sur la surface plane du support. (Un ressort opposé aux deux touches assure leur appui sur cette surface). Lord Kelvin a utilisé ce montage dans son "déflecteur" pour la compensation des compas de marine. L'aimant de moment magnétique variable pouvait tourner sur la glace du compas, percée axialement du trou cylindrique.

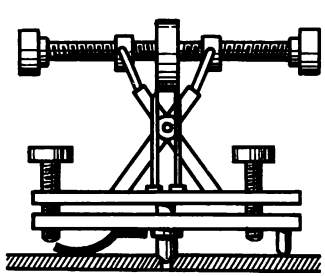


Fig. 11.- Mouvement de rotation par trou-plan déflecteur de Lord Kelvin.

Rotation par cône.- Nous supposons que la partie tournante est un cône mâle de révolution. Pour assurer la rotation autour de son axe, il n'est nullement besoin de réaliser le cône femelle correspondant complet, qui ne laisserait le seul degré de liberté désiré, qu'à condition d'exécuter un usinage absolument parfait. Sinon, le cône "boiterait".

Il est de beaucoup préférable de laisser reposer le cône mobile sur cinq touches de quelques millimètres carrés chacune de surface utile située sur le cône femelle théorique : 4 des touches

seront par exemple placées sur 2 génératrices différentes du cône et dans 2 plans perpendiculaires à son axe, ce qui laisserait un degré de liberté supplémentaire à la pièce mobile (rotation autour d'un axe perpendiculaire à celui du cône et parallèle au plan défini par les 4 touches). La 5e touche sera disposée à l'opposé du plan des 4 premières par rapport à l'axe général (fig. 12).

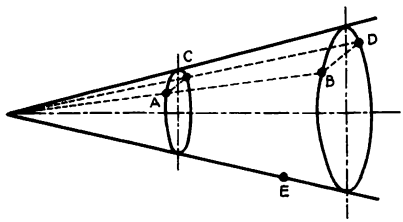


Fig. 12.- Rotation par cône mobile mâle reposant sur 5 touches du cône fixe femelle. Le cône ne peut "boiter".

La nécessité d'usiner un cône femelle complet ne s'impose que dans le cas d'un robinet, uniquement pour des raisons d'étanchéité.

Rotation par rainure circulaire.- On retrouve le dispositif de guidage décrit pour assurer un mouvement de translation par V et plan, mais, dans le cas présent, le V sera réalisé sous forme d'une rainure circulaire centrée sur l'axe de rotation. Le chariot portera 3 pieds dont 2 se placeront dans la rainure circulaire, le 3e reposant directement sur la surface plane.

On dispose ainsi d'un chariot qui peut être complètement excentré (et parfaitement guidé) par rapport à son axe de rotation (fig. 13).

Chemin de roulement à billes.- Pour obtenir un mouvement de rotation **alternatif, extrêmement doux**, de faible amplitude, autour d'un axe parfaitement défini, on peut tourner dans chacune des pièces, fixe et mobile, 2 chemins de roulement en V, de même rayon, recevant 2 des 3 billes. On usinera, de plus, un seul chemin circulaire à profil en V concentrique au premier, sur le support fixe recevant la 3e bille qui portera, d'autre part, sur une surface plane du plateau supérieur. Pour un poids plus important du plateau mobile, on peut employer des groupes de billes ayant exactement le même diamètre.

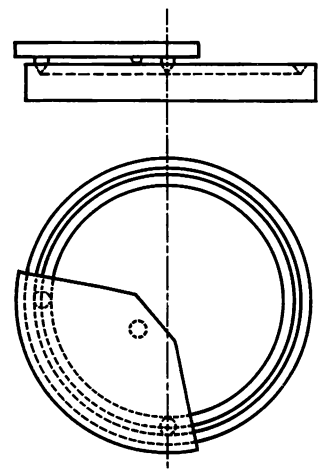


Fig. 13.- Rotation d'une plateforme assurée par 2 trépieds reposant dans une rainure circulaire et 1 pied reposant sur un plan.

Enfin, on peut assurer la rotation d'un plateau lourd complètement circulaire au moyen d'une seule rainure tournée dans le support fixe et d'une rainure correspondante, tournée sous le plateau mobile (fig. 14).

On peut garnir ces rainures d'un grand nombre de billes à condition qu'elles aient toutes rigoureusement le même diamètre.

Ce montage n'est correct que si toutes les précautions d'usinage indiquées sont prises et s'il n'existe aucune déformation des

pièces, sans quoi il apparaitra des passages durs qui correspondront à l'existence de plus de 5 points de contact indépendants.

Bien souvent, on obvie à cet inconvénient en creusant une des rainures (ou les deux) non en V, mais en forme de demi-cercle d'un diamètre légèrement supèrieur à celui des billes, mais le centrage est bien moins rigoureux (fig. 15).

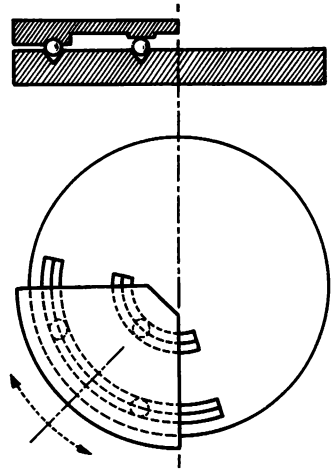


Fig. 14.- Plateforme devant recevoir un mouvement de rotation alternatif :
2 rainures circulaires sur le socle;
1 rainure circulaire et 1 plan sur la plateforme 3 billes

MOUVEMENT HÉLICOIDAL

C'est le mouvement à un seul degré de liberté le plus difficile à bien construire, dans lequel la translation est liée à la rotation, ces deux mouvements restant dans un rapport constant.

Il en résulte que, théoriquement, une vis et un écrou pourraient être réalisés au moyen de 5 points d'appui (abstraction faite des efforts à transmettre). On peut concevoir 4 points d'appui situés sur les génératrices extèrieures du cylindre primitif (diamètre extèrieur des filets de la vis) avec un effort de pression correspondant et un 5e point d'appui latéral sur la rampe du filet de la vis avec également sa force de pression correspondante. Cette conception théorique ne serait évidemment applicable que dans le cas d'un effort à transmettre extrêmement faible, sous peine d'une détérioration rapide du 5e point d'appui latéral.

Fig. 15.- Montage d'une plateforme circulaire pouvant être fortement chargée
1 rainure circulaire en V.
1 rainure circulaire en demi-cercle.
1 série de billes.

Que la vis soit à filets triangulaires (efforts faibles) ou à filets carrés (efforts importants), le problème capital, au point de vue instrument de précision, consiste dans la suppression du jeu axial et du flottement latéral entre la vis et son écrou.

Pour éviter cet écueil, F.C. Pollard préconise l'emploi d'un écrou assez long démuni de ses filets au centre par dégagement cylindrique et muni d'une touche filetée appuyant sur la vis par l'intermédiaire d'une lame ressort, sur les parties extrêmes des filets de l'écrou. Ces filets sont également supprimés sur toute une partie du cylindre intérieur de l'écrou située en regard de la touche, de manière à ne conserver que 4 points d'appui. C'est un peu délicat comme montage.

Un procédé efficace, souvent employé dans les machines à mesurer, consiste à employer un demi-écrou d'une longueur au moins égale à deux fois et demie le diamètre de la vis, appliqué

contre celle-ci par un fort ressort. Ce montage permet, de plus, un débrayage commode, le jeu restant très faible si l'écrou a primitivement été rôdé sur la vis (procédé qui est évidemment à rejeter si on utilise un écrou complet (fig. 16).

On cherche souvent à supprimer le jeu en fendant l'écrou dans sa longueur et en l'appliquant sur la vis par un serrage transversal. C'est un procédé simple mais anti-mécanique, ne pouvant se concevoir que pour un montage peu précis, ou pour assurer un serrage définitif de la vis sur son écrou après réglage.

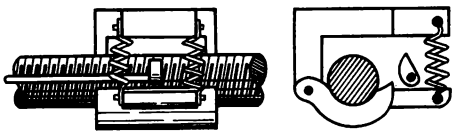


Fig. 16.- Montage d'un demi écrou muni d'un débrayage.

Signalons que dans le cas où le débrayage de l'écrou n'est pas absolument indispensable, sa fixation sans jeu sur le chariot et sans frottement par rapport à la vis peut être assurée par un dispositif de lames ressorts occupant toute la longueur de l'écrou, montage dérivé de celui préconisé par F. C. Pollard. On peut aussi, et plus facilement, se contenter d'intercaler entre l'écrou et son support en forme de berceau une bande faiblement élastique constituée par une simple feuille de liège ou de moëlle de sureau.

Un procédé plus mécanique, qui donne de bien meilleurs résultats, consiste à employer, non pas un, mais deux écrous rapprochés, solidaires l'un de l'autre, au moyen de vis de serrage parallèles à l'axe général, avec, au besoin, interposition de rondelles ressorts sous les têtes de vis. On supprime ainsi à la fois le jeu axial et le flottement latéral (les 2 écrous n'étant jamais rigoureusement centrés) tout en conservant un mouvement relativement doux de la vis dans son écrou (fig. 17).

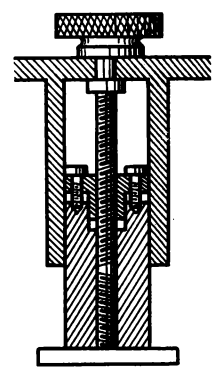


Fig. 17.- Montage d'une vis sans jeu au moyen de 2 écrous de serrage axial variable.

Insistons sur le fait qu'il y a toujours intérêt à prévoir des vis d'aussi gros diamètre que possible et des écrous simples ou multiples relativement longs.

Commande d'un chariot par vis.- Nous avons envisagé la vis, non pas comme organe de serrage, mais comme dispositif de commande d'un autre organe de machine, qui sera généralement un chariot. Son mouvement de translation peut être obtenu facilement en maintenant la vis suivant son axe et en rendant son écrou solidaire du chariot. On retrouve le montage précédemment indiqué.

Mais on peut également faire pousser le chariot par la vis, qui se déplace alors dans son écrou fixe. Et il importe, dans ce cas, d'éviter tout jeu entre l'extrémité de la vis et le chariot et de s'assurer que les déplacements de ce dernier sont bien proportionnels à la rotation de la vis. L'appui entre le chariot et l'extrémité de la vis doit être assuré par un ressort logé, par exemple, sous le chariot et dont la longueur doit être en rapport avec la course totale.

On peut éliminer le défaut de proportionnalité entre la translation du chariot et la rotation de la vis par un centrage parfait de l'extrémité de la vis tournée en cône émoussé et en s'assurant que le point d'appui du chariot sur la vis soit bien perpendiculaire au mouvement de translation (bien que cette condition ne soit pas

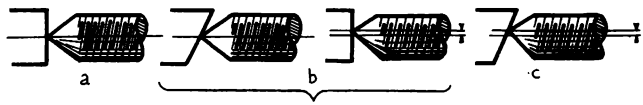


Fig. 18.- Vis de commande de translation d'un chariot par poussée.
a) Montage correct.
b) Montages acceptables, mais incorrects.
c) Mauvais montage (défaut de proportionnalité entre le mouvement de translation du chariot et le mouvement de rotation de la vis).

théoriquement indispensable). Mais il faut surtout éviter les défauts simultanés d'excentricité de l'extrémité de la vis et de faux équerre du plan d'appui (fig. 18).

Pour éviter un usinage trop précis, on établit quelquefois la liaison entre l'extrémité de la vis et le chariot par l'intermédiaire d'une petite tige en acier terminée par 2 cônes légèrement émoussés s'engageant dans des logements pratiqués en regard sur le chariot et à l'extrémité de la vis, l'appui étant toujours assuré par un fort ressort (fig. 19-a).

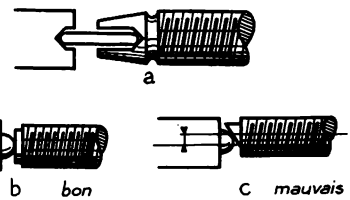


Fig. 19.- Vis de commande de translation d'un chariot par poussée.
a) Montage demandant moins de précision dans l'exécution que les précédents.
b) Autre montage correct.
c) Montage défectueux.

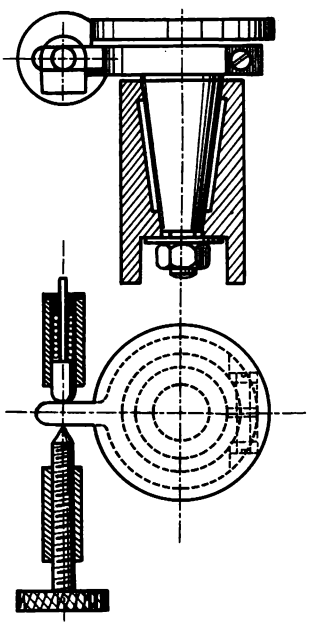


Fig. 20.- Exemple de montage classique de commande de rotation d'une plateforme montée à cône.
Rotation assurée par un dispositif sans jeu avec blocage possible du collier d'entrainement.

Ce système de translation commandée par vis de poussée et ressort est également très utilisé pour produire un mouvement de rotation de faible amplitude d'une plateforme tournante quelconque (fig. 20).

Dans ce cas, la platine montée à cône par exemple, présente un doigt fixe ou mobile par collier de serrage pincé entre l'extrémité de la vis de commande et le poussoir appuyé par un fort ressort antagoniste.

Enfin, ne quittons pas les vis envisagées cette fois comme organe de serrage, sans signaler le grand intérêt pratique que présente l'existence, à l'extrémité du filet, d'une partie cylindrique qui facilite son entrée dans le trou fileté correspondant (précaution particulièrement utile dans le cas où la vis est souvent démontée).

Dans le même ordre d'idées, l'entrée d'une bague filetée de gros diamètre et de pas assez fin (barillet par exemple) sur ou dans un tube fileté correspondant, se fera d'autant plus facilement qu'on aura prévu une partie cylindrique de guidage et qu'on aura fait sauter le début des filets sur chacune des pièces, sur un demi-tour environ, et ce de manière à pouvoir présenter des débuts de filets bien définis au moment de leur mise en prise.

On évite ainsi les serrages de travers, si désagréables et si néfastes pour les filets.

SYSTÈME A 2 DEGRÉS DE LIBERTÉ

Pour obtenir un solide doué de 2 degrés de liberté, il suffit de l'assujettir à reposer sur 4 points fixes. Dans ce cas, tous les points du solide peuvent décrire des surfaces et il peut exister une infinité d'axes instantanés de rotation qui, théoriquement, peuvent être remplacés par 2 axes instantanés de rotation conjugués. Pratiquement, les 2 axes de rotation sont fixes, indépendants de la position initiale du solide.

Un de ces axes peut être rejeté à l'infini, ce qui conduit à un mouvement de rotation et un de translation. Si les 2 axes sont rejetés à l'infini, on obtient 2 mouvements de translation.

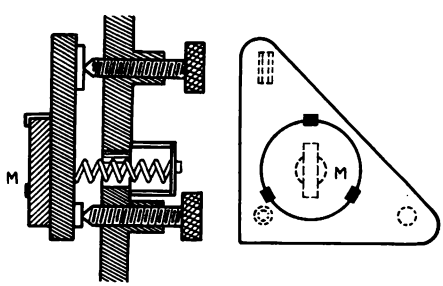


Fig. 21.- Montage géomètrique d'un miroir dont le réglage peut être assuré suivant 2 directions rectangulaires grâce à l'emboitement trou-trait-plan.

Finalement, et d'une manière générale, on retombe sur une combinaison de 2 mouvements à un degré de liberté étudiée antérieurement.

Nous avons affaire à des mécanismes de types extrêmement variés dont la description sort du cadre de cette documentation. On peut cependant concevoir que les deux mouvements envisagés peuvent être, soit absolument indépendants, soit solidaires entre eux.

Dans le cas du dilatomètre de Chévenard (fig. 3) nous avons la combinaison de 2 mouvements de rotation dont l'un dépend de la température et l'autre de la différence de dilatation entre l'échantillon et la tige étalon.

Ce même montage sur 3 points au sommet d'un triangle rectangle peut avantageusement remplacer, dans le cas de déplace-

ments angulaires de miroirs d'assez grandes dimensions, celui qui est couramment employé et qui consiste dans la fixation du support en 3 points situés aux sommets d'un triangle équilatéral. Ce dernier montage est plus équilibré, mais ne permet pas le réglage si pratique du miroir suivant 2 directions rectangulaires (fig. 21).

Signalons encore la combinaison d'un mouvement de rotation (utilisé) et d'un mouvement de translation (non utilisé) réalisée dans le dispositif de couteaux de balance du Professeur Pollard, susceptible de fournir des efforts latéraux sans qu'il en résulte de déréglage quelconque.

Contrairement au montage classique d'un couteau de balance sur un plan (système à 4 degrés de liberté) le couteau du Professeur Pollard est constitué par un assemblage de 3 barres de section rectangulaire, les 3 tronçons ayant une arête commune. Celle-ci repose sur 4 plans inclinés ne laissant ainsi que 2 degrés de liberté, une translation inutilisée et le mouvement intéressant de rotation (fig. 22).

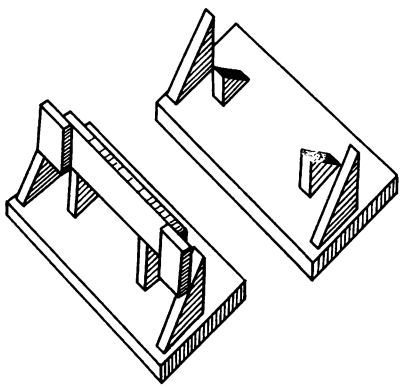


Fig. 22.- Montage à 2 degrés de liberté (et non 4 comme dans le cas normal) d'un couteau de balance (Pollard).

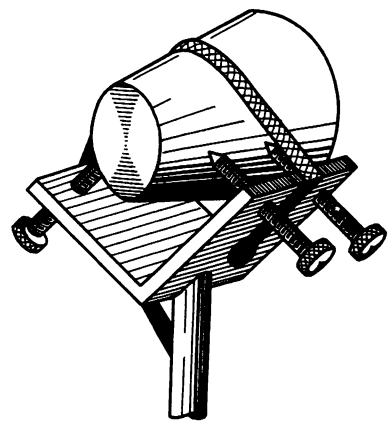


Fig. 23.- Montage à 2 degrés de liberté d'une pièce cône (Dunoyer).

Ce montage est beaucoup moins sujet à provoquer des efforts nuisibles que celui qui est couramment employé et qui consiste à loger le couteau dans une partie en V d'angle plus grand.

Enfin, mentionnons également les pinces de serrage de L. Dunoyer qui permettent de fixer géométriquement des pièces cylindriques ou côniques au moyen de 4 points définis par des extrémités de vis de longueur réglable et d'une tresse de maintien.

SYSTÈME A PLUS DE 2 DEGRÉS DE LIBERTÉ

Il est extrêmement rare de se trouver en présence d'un système dans lequel les degrés de liberté en nombre supérieur à 2 soient assurés simultanément. Généralement, les degrés de liber-

té sont réalisés indépendamment les uns des autres et nous nous trouvons alors en présence d'une combinaison de mouvements élémentaires précédemment envisagés.

Une exception peut toutefois être faite pour le système des joints à rotule, possédant 3 degrés de liberté. Théoriquement, les points d'appui du corps mobile sur la sphère fixe doivent être concrétisés par 3 petites surfaces concaves de même rayon que celui de la boule centrale, celle-ci étant plaquée sur ses touches au moyen d'un serrage à raideur variable par exemple. Ainsi conçue, la boule tournera dans sa sphère guide sans risque de coincement, contrairement à ce qui se produit habituellement lorsqu'on cherche à réaliser 2 sphères presque complètes, de même rayon, tournant l'une dans l'autre.

PROJET DE CONSTRUCTION D'UN INSTRUMENT DE PRÉCISION

Après avoir décrit les principaux mouvements élémentaires, considérons le projet de construction de l'ensemble d'un instrument de précision.

Cette étude peut se concevoir sous deux aspects différents suivant l'outillage dont on dispose mais l'idée directrice restera toujours la même : l'instrument doit être adapté à son emploi.

a) L'appareil doit être construit dans un atelier de mécanique de laboratoire, ne possédant qu'un outillage restreint (par exemple un tour, un petit étau limeur, une fraiseuse simple et du petit outillage) ;

b) L'appareil doit être construit dans un atelier bien outillé.

On s'attachera dans le premier cas à dessiner des pièces simples, assemblées par vis ou soudées. L'appareil présentera des lignes anguleuses, le tout d'aspect géométrique non galbé.

Dans le second cas, on aura souvent intérêt à dessiner des pièces plus compliquées nécessitant presque toujours la confection de modèles et de pièces fondues.

L'appareil ainsi conçu pourra être exécuté en réduisant les heures de travail de l'atelier; il sera d'autre part bien plus rigide à moins de frais et pourra présenter une ligne plus agréable à l'oeil.

Or, il est bon de tenir compte du côté esthétique d'un appareil. Il est incontestable que l'on travaille avec plus de goût lorsqu'on se sert d'un instrument bien étudié, bien construit, d'un maniement commode et d'un aspect séduisant. Et puis on le manie avec plus de précautions, on l'entoure d'égards et toute l'ambiance du laboratoire peut s'en ressentir. On n'insistera jamais assez sur la nécessité qu'il y aurait d'assimiler, au point de vue propreté, un laboratoire de physique à une salle de chirurgie. On ne se rend en général pas assez compte de l'augmentation considérable de rendement qui pourrait résulter de travaux exécutés proprement avec des appareils soignés, dans un laboratoire net.

Remarque technique importante.- Généralement, l'expérimentateur est pressé de disposer de son appareil ; il voudrait le voir construit avant d'être étudié. La manière dont il sera conçu peut évidemment influer sur son délai de fabrication dans de grandes limites.

Bien souvent, malgré l'augmentation du nombre d'heures de travail effectif résultant de la conception a), on gagnera sur le temps total de fabrication par rapport à la conception b) du fait que l'on élimine le temps d'établissement des modèles et de fourniture des pièces fondues. Il peut donc y avoir intérêt pour un prototype d'appareil à le concevoir suivant a), même si l'on dispose d'un atelier bien outillé. Mais, dès que les premiers essais sont terminés, il faut avoir recours, si possible, aux modèles et aux pièces fondues.

Bien entendu, il ne peut être question ici de la construction d'appareils en séries qui nécessitent un autre genre d'étude dans lequel les facteurs simplicité et prix de revient prennent une importance capitale.

Avant de donner quelques indications sur la construction d'un instrument de précision, il est nécessaire de rappeler quelques notions élémentaires concernant l'établissement des modèles et des pièces de fonderie que l'on ne doit pas hésiter à employer, comme indiqué ci-dessus, le plus souvent possible.

MODÈLES ET PIÈCES DE FONDERIE

Une pièce fondue est obtenue d'après un modèle qui, dans les appareils de grande série, peut être métallique, mais que nous supposons, dans le cas présent, toujours construit en bois. Ce bois est choisi plus ou moins dur selon que le modèle est destiné à servir à la confection d'une seule ou de plusieurs pièces et suivant que l'on envisage ou non sa conservation après emploi.

Pour réaliser une pièce fondue de forme déterminée on doit donc commencer par construire un moule dont les creux correspondront aux reliefs de la pièce désirée, et la confection de ce moule est obtenue en tassant autour du modèle du sable qui en épouse tous les contours. Puis le modèle est retiré, laissant un creux dans lequel est coulé le métal fondu. Cette opération terminée, la pièce est démoulée après refroidissement puis ébarbée avant d'être usinée.

Retrait.- Le modèle n'est jamais exactement aux cotes de la pièce à exécuter, il est toujours plus grand afin de tenir compte du retrait présenté par le métal au refroidissement. Le retrait est de l'ordre de 10 à 25 pour 1000 suivant le métal. Les chiffres adoptés sont sensiblement les suivants : fonte 10 pour 1000 ; bronze : 15 pour 1000 ; aluminium 12 à 13 pour 1000 et acier 18 à 20 pour 1000.

D'autre part, les modèles doivent être prévus avec des formes permettant d'en faciliter le démoulage (dépouille).

On voit de suite, qu'il est prudent de prévoir le dessin de la

pièce métallique de manière à faciliter la confection du modèle d'une part, et l'opération de fonderie, d'autre part.

Suivant la complexité de la pièce métallique à exécuter, on peut prévoir la confection, soit d'un modèle simple, soit d'un modèle démontable, soit enfin d'un modèle avec boîte à noyau. Dans le cas de pièces de révolution, on simplifie souvent le modèle en le remplaçant par une planche à trousser.

Ebranlage du modèle - Dépouille.

Pour sortir le modèle autour duquel le sable a été serré, il est nécessaire de l'ébranler légèrement, ce qui a l'inconvénient d'augmenter les dimensions du moule et risque de le déformer. On évite en partie cette manoeuvre délicate en donnant au modèle un profil tel qu'on puisse le sortir facilement. On lui met de la "dépouille" en donnant aux parties inférieures du moule des dimensions légèrement plus faibles que dans la partie supérieure. C'est ainsi qu'une partie cylindrique sera tournée légèrement cônique et que les nervures du socle par exemple présenteront une section, non pas rectangulaire, mais légèrement trapézoïdale (fig.24).

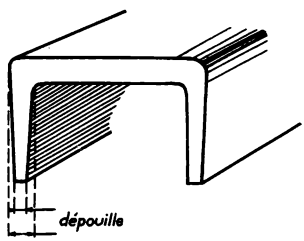


Fig. 24.- "Dépouille" pratiquée sur un modèle pour en faciliter le démoulage.

Si le modèle présente, de par sa forme, des parties en contre-dépouille, qui provoqueraient son arrachement au démoulage, on doit, en se référant à ce qui sera indiqué plus loin, soit rapporter une pièce battue, soit rendre le modèle démontable.

Congés.

Les ornements que l'on rencontrait dans certains instruments déja anciens sont évidemment inutiles, donc nuisibles et le côté purement esthétique d'un appareil, facteur d'ailleurs très important, doit uniquement résider dans sa ligne générale qui doit être agréable à l'oeil et, point de vue plus terre à terre, qui doit faciliter le nettoyage de l'instrument.

C'est ainsi que les raccords entre surfaces inclinées l'une par rapport à l'autre se font généralement au moyen d'une partie arrondie nommée "congé", qui a pour but supplémentaire de donner plus de solidité à la pièce (fig. 25). Ce "congé" peut être réalisé sur le modèle soit par une petite pièce en bois rapportée ou prise dans un des éléments, soit par une bande de cuir. Très souvent, le modeleur se contente de peindre en noir le dièdre formé par les deux pièces, ce qui indique au mouleur la nécessité d'effectuer le congé voulu.

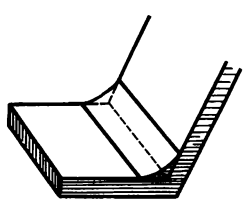


Fig. 25. - "Congé" permettant un nettoyage plus facile de la pièce et augmentant sa solidité.

Moulage d'un modèle simple ou "nature".- Le moulage d'une pièce simple dont le modèle est représenté figure 26 s'effectue en

deux temps. On commence par tasser du sable humide dans le demi-châssis encadrant la pièce posée à plat sur une plaque quelconque. Puis, le châssis étant retourné, on place la deuxième partie du châssis sur la première, après avoir fait un joint entre les deux, au moyen de poussier de charbon. La couche de sable de la deuxième partie présente plusieurs trous, les uns destinés à la coulée du métal fondu, les autres à l'évacuation de l'air contenu dans le moule (fig. 26) (évents).

On découple les deux châssis, on enlève le modèle, on fait sécher les moules, on referme les châssis l'un sur l'autre et on effectue la coulée. Après refroidissement, le moule est détruit; on tranche les jets produits par la coulée et les évents et on ébarbe la pièce.

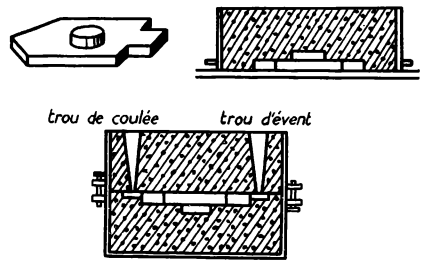


Fig. 26.- Moule pour modèle simple : Châssis en 2 parties.

Moulage d'un modèle démontable.

Prenons un modèle un peu plus compliqué, par exemple, celui de la figure 27 représentant un cylindre terminé par deux plaques circulaires débordantes. Cette pièce peut être moulée de plusieurs façons :

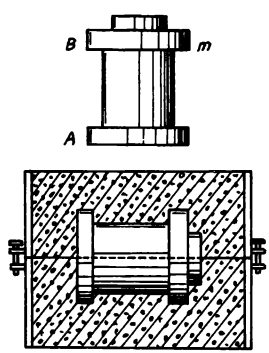


Fig. 27.- Moule simple pour une pièce cylindrique dont le modèle peut être démonté en 2 parties.

a) On peut effectuer le moulage en plaçant l'axe du modèle horizontalement. La moitié de la pièce appartiendra au chassis inférieur, l'autre moitié au châssis supérieur. On retrouve ainsi un genre de moulage analogue au précédent, employé notamment pour des petites poulies dans lesquelles la distance séparant les joues est assez grande par rapport aux dimensions de celles-ci. Le modèle peut d'ailleurs être réalisé en deux parties démontables, le plan de section coïncidant avec la surface de séparation des deux chassis (fig. 27).

Mais on peut opérer de deux autres manières : soit en utilisant deux châssis couplés comme ci-dessus, mais avec interposition d'une pièce battue, soit en utilisant trois éléments de châssis.

b) Moulage par pièce battue.

Le modèle est démontable en m. On le pose à plat sur la bride A et on bat du sable dans la partie C qui se trouve isolée du restant du sable de garniture par une couche de poussière de charbon (cette pièce battue est faite en plusieurs morceaux pour rendre possible son démoulage). On finit de garnir le châssis de sable; on le retourne et on garnit le châssis supérieur. Puis on découple

les deux châssis et on enlève le modèle en sortant d'abord la plaque A ainsi que le cylindre central, la plaque B restant en place. On enlève les différentes parties de la pièce battue C puis le restant du modèle B. On remet les pièces de sable battu C en place et on termine comme précédemment (fig. 28).

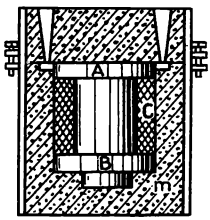


Fig. 28.- Moulage du même modèle en utilisant une pièce battue C (en sable) pouvant être en plusieurs parties. Le modèle est, de plus, démontable en m.

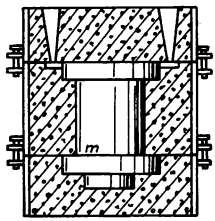


Fig. 29.- Moulage sans pièce battue, mais en utilisant un châssis en 3 parties.

Ce genre de moule exige de nombreux joints qui le rendent fragile. Il n'est guère utilisé que pour les pièces de fonderie d'art.

c) On peut éviter la pièce battue en conservant le modèle démontable en m mais en utilisant trois éléments de châssis. Le dessin montre clairement les différentes opérations à effectuer. On peut ainsi utiliser un empilage de plusieurs châssis en rapport avec le nombre de parties démontables du modèle (fig. 29). Il faut signaler que, dans certains cas, la multiplicité des parties en relief sur un modèle ne permet pas au mouleur d'effectuer autant de joints qu'il serait nécessaire. Prenons le cas représenté par une pièce cônique par exemple, munie de bossages multiples. Pour faciliter le démoulage de la pièce, il suffira de rendre ces bossages démontables. Le moule sera donc effectué en laissant les bossages à leur place, après en avoir enlevé les vis de fixation. Le démoulage se fera par sortie de toute la partie conique centrale puis enlèvement par le trou ainsi formé de tous les petits éléments démontables (fig. 30). Pour assurer la mise en place de ceux-ci et pour éviter leur déplacement pendant le bourrage du sable, les bossages sont souvent emmanchés à queue d'aronde avec beaucoup de jeu, en reposant sur la partie inférieure (portée anglaise).

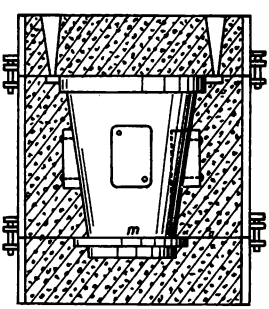


Fig. 30.- Moulage d'un modèle présentant des bossages amovibles (ceux-ci ne restent pas fixés à la partie centrale du modèle - une fois le sable tassé on sort le cône central, puis les bossages par le vide central ainsi pratiqué). (en pointillé, portée anglaise).

Moulage par boîtes à noyaux.

Une pièce mécanique coulée présente souvent une telle complexité de forme qu'il est impossible de faire un modèle, même démontable, qui soit facile à sortir du moule. C'est le cas qui se présente lorsqu'il existe des évidements ou lorsque le modèle possède des parties trop fragiles. Le modèle comprend alors plusieurs parties bien distinctes.

En principe, le modeleur effectuera un modèle représentant le contour extérieur de la pièce, puis une série de petits modèles

accessoires qui serviront à faire les "noyaux" ou masses de sable, dont les contours épouseront exactement la forme des évidements intérieurs de la pièce. Ces noyaux sont maintenus à l'intérieur de l'évidement créé par le moulage du modèle extérieur au moyen de portées en relief qui s'engageront dans les évidements correspondants du moule du contour extérieur de la pièce.

Il en résulte que le modèle du contour extérieur présentera, de plus, des portées extérieures mâles (parties généralement peintes en noir) qui correspondront à des évidements et la boîte à noyau présentera, en plus du contour reproduisant l'évidement de la pièce, des logements femelles correspondant aux portées mâles du modèle extérieur

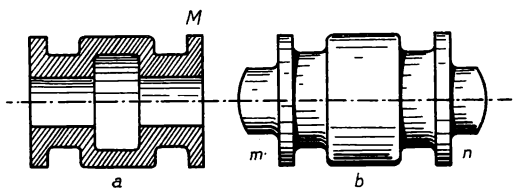


Fig. 31.- Modèle avec boite à noyau.
a) Pièce désirée M.
b) Premier modèle représentant le contour extérieur de M plus les parties m et n.

Pour fixer les idées, soit à établir les modèles en bois destinés à la réalisation d'une pièce fondue telle que M (fig. 31) : le modeleur tournera d'abord un modèle représentant le contour extérieur de la pièce M auquel il adjoindra axialement deux parties cylindriques extérieures d'un diamètre correspondant au diamètre intérieur de la pièce. Ce sont les portées m et n. Puis il établira une boite à noyau permettant de faire le noyau de sable qui, placé dans le moule effectué avec le premier modèle, réservera à la fonderie les parties creuses intérieures de la pièce.

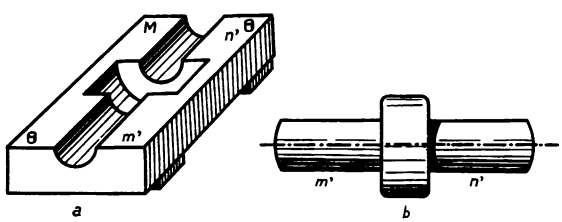


Fig. 32.- Boite à noyau (suite).
a) Demi-boite à noyau permettant de battre la pièce de sable.
b) Dont les dimensions correspondent à l'évidement de la pièce M augmentée des 2 portées de maintien m' n'.

La boite à noyau dans laquelle on battra le sable sera faite en deux parties facilement démontables (fig. 32).

La pièce de sable battu aura même longueur totale que le modèle A ; les parties extrêmes m' n' venant se loger dans les évidements créés dans le moule par les portées m n (fig. 31).

Bien souvent, dans le cas de noyaux destinés à réserver des évidements assez plats, les boites à noyaux sont effectuées sous forme de simples caissons dont la profondeur est toujours augmentée des portées nécessaires. Ces caissons peuvent même être simplifiés et constitués par un simple cadre et une raclette.

Enfin, dans certains cas, pour des bâtis assez volumineux de machines-outils par exemple, moulés par boites à noyaux, on ne constitue pas des modèles massifs qui nécessiteraient trop de bois

et qui seraient difficiles à manier en raison de leur poids, mais on construit le modèle en "caisson". On s'arrange de plus, dans le cas de bâti en forme de cadre, de manière à utiliser une seule pièce servant à la fois pour le modèle et pour la boite à noyau, en fermant complètement le modèle à l'aide de planches en bois amovibles qui permettent de battre ainsi le noyau central.

Planche à trousser

Le trousseau a pour but de simplifier considérablement les modèles des pièces de révolution telles que poulies, volants, engrenages, etc.

Il est généralement constitué par une palette en bois susceptible de tourner dans une crapaudine autour d'un axe vertical. Cette palette présente le profil de la pièce à couler.

Soit par exemple à réaliser un moule pour une poulie suivant le dessin. Le moyeu de la poulie est seul constitué par un modèle plein ainsi que les bossages, s'il en existe (fig. 33). L'axe de la raclette passe dans le moyeu et vient s'engager dans la crapaudine. Le modeleur préparera deux planches dont les profils correspondent à ceux des parties supérieure et inférieure de la poulie. Un des deux châssis présentera donc en creux le profil inférieur et l'autre le profil supérieur obtenu par rotation de la planche à trousser dans le sable de chacun des châssis. Les joints entre les deux châssis sont réalisés comme précédemment. Signalons enfin que le trousseau peut s'employer, non seulement pour exécuter des pièces de révolution, mais également pour exécuter, des bras de volant par exemple. Dans ce but, la raclette qui présente comme profil celui de la demi-section du bras est déplacée en raclant le sable suivant un guide qui peut être droit dans le cas de bras rectilignes ou incurvé dans le cas de bras courbes.

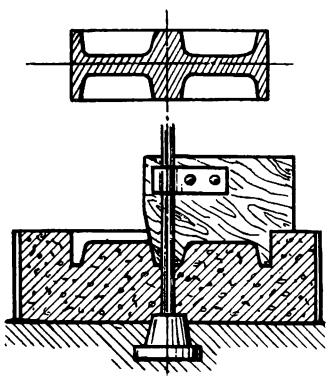


Fig. 33.- a) Pièce désirée : poulie
b) Montage de la planche à trousser qui permettra, par rotation d'obtenir le moule désiré. On évite ainsi de faire un modèle complet.

Enfin, le dessinateur ne devra pas oublier de signaler au modeleur les parties de la pièce qui seront ultérieurement à travailler et non à laisser bruts, de manière que le modeleur puisse mettre des surépaisseurs aux endroits indiqués. Ces surépaisseurs seront ultérieurement les seules parties à usiner et elles doivent être suffisamment importantes pour que l'outil passant en dessous de la croûte superficielle dans laquelle se trouvent souvent inclus des grains de sable, puisse pénétrer franchement dans la partie saine du métal.

Nous n'insisterons pas sur les procédés de coulée du métal qui, bien souvent, s'effectue, non par le dessus, mais par le des-

sous de la pièce, ni sur la nécessité de laisser à la partie supérieure du moule des vides destinés à recevoir la crasse de la coulée. Par contre, au point de vue du dessin des pièces, il faut insister sur la nécessité qu'il y a de chercher à réaliser les épaisseurs aussi uniformes que possible des diverses parties de la pièce; les différences d'épaisseur conduisent presque inévitablement à provoquer, pendant le refroidissement dans le moule, des retassures, des criques ou des soufflures très préjudiciables à la solidité de la pièce et qui, dans certains cas, peuvent la rendre complètement inutilisable. Cette dernière recommandation est particulièrement importante dans le cas de moulage de pièces devant tenir le vide à la pression.

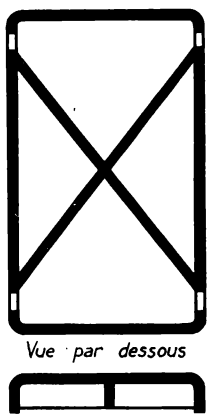


Fig. 34.- Modèle de table fortement nervuré pour éviter les déformations.

QUELQUES PRINCIPES DE CONSTRUCTION

Nous pouvons maintenant passer au projet d'étude d'un instrument de précision.

Les différents organes d'un tel instrument sont généralement montés sur un socle dont la forme dépendra évidemment de l'encombrement total de l'instrument, de la complexité de ses organes et de son emploi.

Les différentes formes de socles peuvent toutefois se rattacher à trois types principaux : la table, le trépied et le banc d'optique.

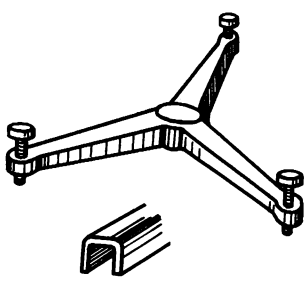


Fig. 35.- Modèle de trépied plein ou fortement allégé.

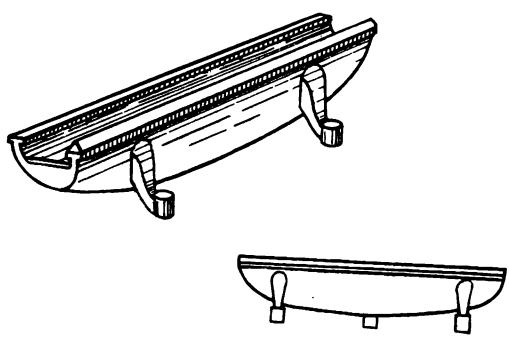


Fig. 36.- Modèle de banc rigide pratiquement indéformable monté sur 3 pieds.

Quelle que soit sa forme, le socle doit posséder une qualité fondamentale : ne pas se déformer - et une qualité secondaire : ne pas être trop lourd - du moins dans la majorité des cas. Dans certains instruments, en effet, il est quelquefois utile de donner au socle un poids important par rapport à celui de l'appareil lui-même, dans le but d'assurer à ce dernier une bonne stabilité (pied d'un microscope, socle d'un appareil de mesure à fil de suspension, etc.

Pour réunir ces deux qualités : non déformabilité et légèreté, on a recours soit aux cornières pour les pièces assemblées, soit aux nervures pour les pièces moulées.

Prenons une table, par exemple. Si on ne veut pas s'astreindre à faire exécuter une pièce de fonderie, la table pourra être constituée par une planche métallique de quelques millimètres d'épaisseur (par exemple planche de duralumin de 6 à 8 mm. d'épaisseur) rendue rigide par une ceinture dont la hauteur d'aile sera en rapport avec les dimensions de la table, soit de 40 à 80 mm. en moyenne. Cette ceinture ne suffit pas à elle seule et, pour éviter le gauchissement, il faudra, de plus, fixer en biais sous la table d'autres cornières ou des fers en T de manière à réaliser un ensemble très rigide. Mais on n'arrivera jamais, par ce procédé, à la tenue d'une pièce de fonderie qui, munie d'une ceinture assez haute et de nervures transversales ou en biais, offre, de plus, l'avantage de simplifier le travail mécanique qui se limitera, dans ce cas, à un rabotage du plateau et au perçage et taraudage des trous de fixation des différentes pièces de l'instrument (fig. 37).

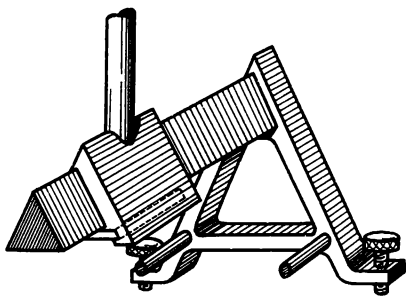


Fig. 37.- Montage d'un banc d'optique à section triangulaire et support en V.

Dans le cas de socle assez important, il est bon de prévoir, dans la ceinture extérieure, des ouvertures rectangulaires (modèles avec petites boîtes à noyaux) permettant le passage des mains pour faciliter la prise et le déplacement de l'instrument, ce qui évite l'adjonction de poignées encombrantes.

Le trépied est généralement constitué par une pièce de fonderie en fonte et d'empattement suffisant pour assurer ainsi et par son poids une bonne stabilité de l'instrument.

Un bossage central sera souvent la seule partie travaillée permettant la fixation du tube ou de l'axe général servant de support à la partie utile de l'appareil. Si la hauteur du trépied dépasse plusieurs centimètres, en raison de l'encombrement de l'instrument, il peut être utile de l'alléger en laissant un évidement vers la partie inférieure (forme nervurée).

Les trois extrémités du trépied recevront souvent trois vis calantes bien ajustées.

Quant au banc d'optique, il pourra être constitué comme indiqué précédemment, soit par des barres d'acier calibrées et rectifiées, soit par une pièce de fonderie munie à sa partie supérieure d'un plat et d'un V. Ne pas hésiter à donner à ce banc une hauteur assez importante au maître couple pour obtenir un solide bien indéformable.

On peut également constituer un excellent banc d'optique, lorsqu'il doit être assez court, en rabotant, fraisant et rectifiant une

barre d'acier cylindrique, de manière à lui donner une section triangulaire.

Il est maintenant bien évident qu'il est impossible de fournir des renseignements précis sur tous les cas de construction qui peuvent se présenter, mais quel que soit le type d'appareil à construire, il sera bon d'avoir toujours présents à l'esprit les principes de construction géométrique fournis précédemment.

Nous allons simplement insister sur quelques montages rencontrés couramment dans la construction des instruments.

Coulissage et fixation d'une tige ou d'un tube dans un autre tube.

Soit un tube coulissant sur une tige cylindrique ou un autre tube épais. La fixation de la coulisse peut s'effectuer de bien des manières, mais il en est une qu'il faut à tout prix éviter, c'est celle qui consiste à utiliser une simple vis dont l'extrémité appuie sur la tige ou le tube central.

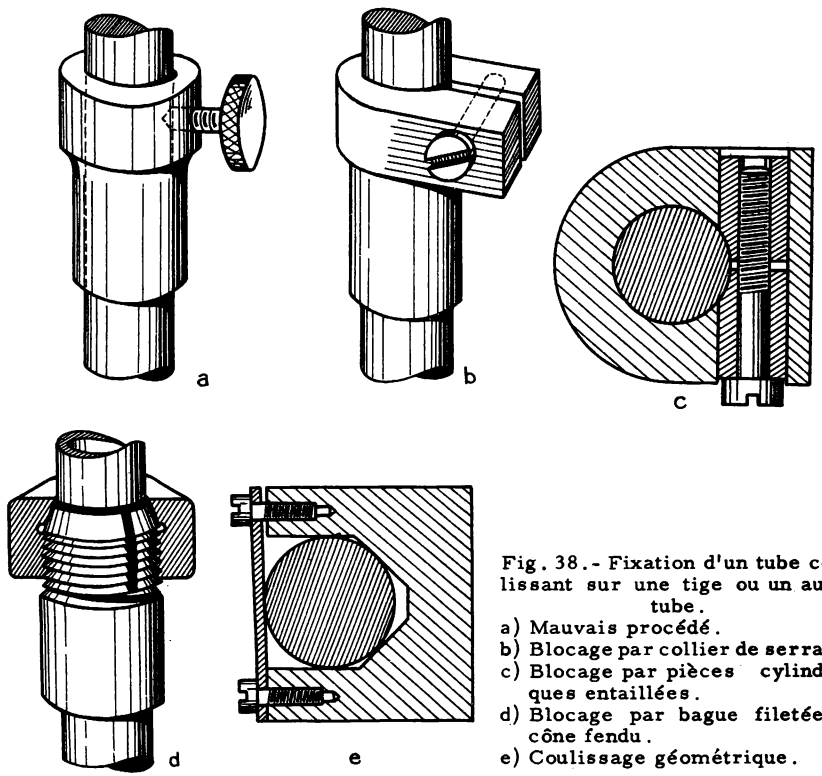


Fig. 38.- Fixation d'un tube coulissant sur une tige ou un autre tube.
a) Mauvais procédé.
b) Blocage par collier de serrage
c) Blocage par pièces cylindriques entaillées.
d) Blocage par bague filetée et cône fendu.
e) Coulissage géométrique.

On provoque ainsi fatalement des déformations locales qui finissent par empêcher tout coulissage correct (a).

On peut, par contre, employer soit un collier latéral (b), soit un serrage au moyen de deux pièces logées dans un cylindre appartenant à la coulisse, perpendiculaire à la tige centrale. Ces deux

pièces, rapprochées par une vis, présentent chacune une entaille également cylindrique au rayon de la tige centrale et le serrage s'effectue ainsi d'une façon très efficace sans déformation appréciable (c)

Lorsque le serrage de la coulisse doit s'effectuer sur un tube assez mince, le montage connu de serrage au moyen d'une bague moletée et filetée donne toute satisfaction. Celle-ci est tournée légèrement cône intérieurement et serre l'extrémité filetée, également cône du tube coulissant, de plus, fendu en trois ou quatre parties (d).

Si l'on utilise un montage géométrique de la coulisse, montage en V du coulisseau réalisé par quatre touches de petite surface sur le tube cylindrique, le serrage s'obtiendra facilement par serrage d'une lame transversale située entre les quatre touches et formant légèrement ressort (e).

Utilisation de la flexion d'une pièce comme dispositif de réglage fin.

Il arrive souvent que, dans certains appareils d'optique notamment, on ait besoin d'un réglage très précis obtenu, si possible, sans complication exagérée.

Un premier moyen consiste évidemment à employer un montage à vis différentielle pouvant convenir d'ailleurs pour les déplacements atteignant même quelques millimètres (fig. 39).

Dans cette figure, les deux vis V et V auront, par exemple, des pas de 1 mm. et 9/10 de mm., ce qui conduira à un déplacement du chariot C de 1/10 de mm. pour un tour du bouton moleté.

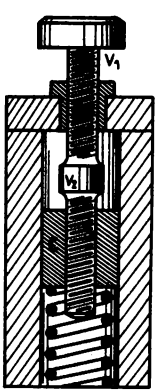


Fig. 39.- Mouvement de translation par vis différentielle et rattrapage de jeu par ressort.

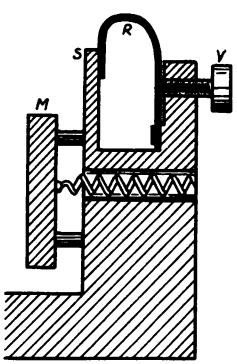


Fig. 40. - Réglage fin obtenu par flexion.

Le déplacement est, dans ce cas, exactement proportionnel à la rotation de la tête de la vis et les résultats sont d'autant plus précis que l'on a soin d'éviter tout jeu par rattrapage au moyen du ressort R et d'employer des vis d'assez gros diamètre.

Mais ce montage est compliqué et lorsqu'il s'agit de terminer un réglage sur une toute petite fraction de millimètre, on peut agir par déformation d'un support de la pièce à régler.

C'est le montage qui fut employé dans l'étalon de longueur par mesure interférentielle de Michelson, appareil dans lequel deux miroirs doivent être rendus exactement parallèles. On règle l'orientation du miroir M (fig. 40), en déformant le bras légèrement flexible S au moyen d'un ressort souple R plus ou moins bandé par la vis V.

En réglant convenablement le rapport des flexibilités des pièces S et R, il est facile d'obtenir un déplacement extrêmement faible de S pour un déplacement notable de la vis V. Ce montage peut être beaucoup plus couramment employé qu'il ne l'est en optique et en mécanique.

A ce propos, il n'est pas inutile de rappeler que c'est grâce à l'élasticité des pièces que l'on peut, dans les montages mécaniques, échapper à la règle des six degrés de liberté et que le nombre des liaisons peut être supérieur, dans beaucoup de cas, à celui qui serait théoriquement nécessaire.

Cette considération conduit directement aux montages hyperstatiques qui ne présentent d'ailleurs qu'un intérêt de second ordre dans la construction des instruments de laboratoire.

Amplificateurs mécaniques de petits mouvements.

Signalons très rapidement les amplificateurs optiques si couramment utilisés conjointement avec les amplificateurs mécaniques pour effectuer la lecture à vue ou l'enregistrement d'un phénomène quelconque en citant pour mémoire :

Le levier optique de Cornu permettant de mesurer de faibles épaisseurs.

Double miroir, doublant la déviation d'un faisceau lumineux obtenu avec un seul miroir, en provoquant deux réflexions successives sur le miroir mobile auquel est adjoint à 45° un miroir fixe.

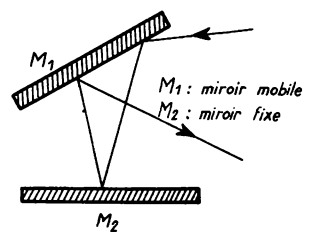


Fig. 41.- Amplification par double miroir et double réflexion.

Les montages d'amplificateurs mécaniques qui sont généralement constitués par des dispositifs de bras de levier, demandent naturellement une absence de jeu totale dans le dispositif de pivotage.

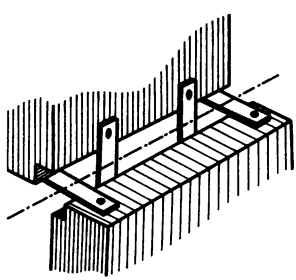


Fig. 42.- Axe de rotation sans jeu défini par la flexion de lames-ressorts croisées.

Aussi remplace-t-on dans la plupart des cas les axes à pivotage entre pointes sur rubis déja très acceptables, par des articulations à lames flexibles. On retrouve ainsi la monture bien connue du balancier de pendule, mais ce dispositif valable pour le pendule vertical est facilement étendu pour la réalisation du pivotage d'un pendule ou d'un bras de levier incliné, horizontal ou soumis à des forces de directions variées.

Il suffit, en effet, de matérialiser l'axe de pivotage au moyen des deux jeux de ressorts à lames fixées dans deux plans rectangulaires et la figure 42 donne une idée exacte de la réalisation.

Ce montage est robuste et exempt de jeu. Son seul inconvé-

nient réside dans la présence du coefficient de raideur introduit par les ressorts. Ce facteur peut d'ailleurs présenter de l'intérêt dans le cas de l'emploi de ce dispositif dans les instruments à fréquence propre d'oscillations un peu élevée. Pratiquement, il est généralement facile de dimensionner la raideur des ressorts aux efforts mis en jeu.

De plus, l'axe de rotation du système est ainsi mieux défini que par l'emploi de pivots, montage qui, même bien exécuté, laisse une incertitude dans la position de l'axe de rotation qui ne coincide jamais exactement avec l'axe géomètrique du système pivotant.

A titre d'indication, la figure 43 représente quelques montages à pivots.

En a) Montage d'un axe de mouvement d'horlogerie.

En b) Montage entre pointes.

La pointe de la vis est très légèrement arrondie et l'angle du cône (de l'ordre de 60°) est un peu plus faible que celui de la pièce pivotante. Le fond du cône femelle doit être usiné avec grand soin et les pièces rodées.

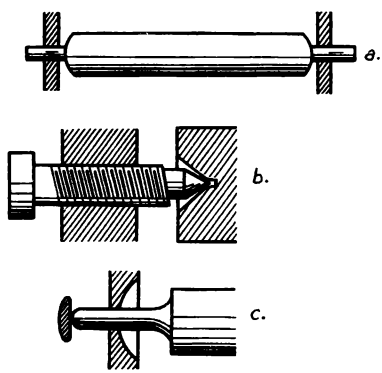


Fig. 43.- Montages à pivots :
a) Avec faible jeu latéral.
b) Entre pointes sans jeu.
c) Sur rubis avec butées.

En c) Le pivotage de l'axe en acier s'effectue dans le trou correspondant d'un rubis et la butée est assurée sur un diamant.

Ces montages à pivots introduisent toujours un coefficient de frottement qui peut ne pas être négligeable. Dans le cas où l'axe de suspension supporte un effort un peu notable, on peut avoir recours aux très petits roulements à billes que l'on trouve dans le commerce et qu'il est toutefois prudent de bien choisir.

Les autres suspensions qui n'introduisent pratiquement ni coefficient d'amortissement, ni raideur sont celles à fil de soie et à couteaux.

La suspension à fil de soie ou de jute est réservée au montage de certains pendules, mais la soie est hygrométrique et ses qualités mécaniques mal définies. Il est préférable d'employer une lame ressort très mince.

Les qualités du couteau sont trop connues pour qu'il soit utile d'insister. Son inconvénient réside dans ses possibilités de glissement sur le plan de repos. On obvie souvent à cet ennui en logeant le couteau dans le fond d'un V de très grand angle, mais dans ces conditions, il ne faut plus compter sur toutes les qualités du montage correct, car il est difficile d'aligner mécaniquement l'arête du couteau et le fond du V. La seule manière d'éviter ces

difficultés est de revenir au montage géométrique précédemment décrit.

Chaque fois que la déviation angulaire de la pièce mobile sera faible, il sera donc préférable d'utiliser une suspension par lames ressorts et le montage d'un amplificateur mécanique de petit mouvement pourra, à titre d'exemple, être réalisé comme suit.

Soit à multiplier mécaniquement le faible déplacement angulaire d'un pendule dont la déviation doit être lue au moyen d'un rayon lumineux.

Le miroir (simple ou double comme indiqué précédemment) est monté sur un support maintenu sur une autre pièce fixe par l'intermédiaire de deux petites lames ressorts. Le déplacement du miroir est assuré au moyen d'un étrier très léger constitué par une lame flexible soudée sur un collier fixé au pendule lui-même (fig. 44).

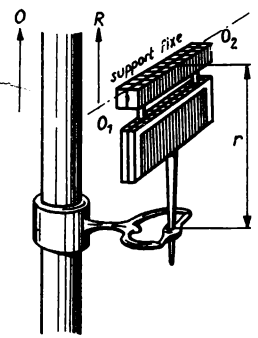


Fig. 44.- Amplificateur optique de déviation angulaire (sans jeu).

Le rapport R/r donne le coefficient d'amplification mécanique du mouvement; ce montage est très robuste mais ne conduit pas à un coefficient d'amplification très élevé (au maximum de l'ordre de 10).

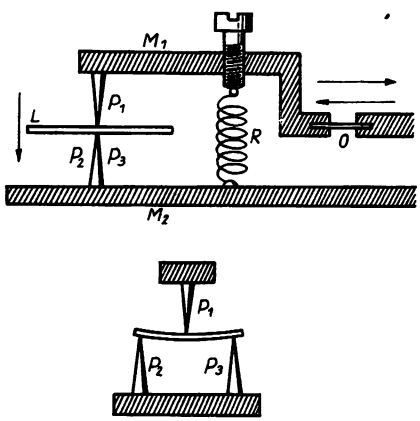


Fig. 45.- Amplificateur mécanique de petit mouvement

Pour obtenir mieux, on transforme le déplacement à amplifier en un mouvement de rotation de l'axe-support de miroir ou de l'aiguille indicatrice (montage bien connu des appareils de mesure électrique).

Signalons un dernier montage d'amplificateur mécanique dans lequel le déplacement amplifié est à 90° du déplacement initial (montage de Erb). (fig. 45).

Le mécanisme comprend une lame oscillante L pressée entre les deux organes M_1 M_2 par trois aiguilles au moyen d'un ressort R.

La pièce O, se déplaçant très légèrement dans le sens horizontal provoquera un basculement de la lame L.

Suivant la position relative des trois pointes, on peut d'ailleurs obtenir un système stable ou instable.

ENTRAINEMENT DES ARBRES

Restant dans le domaine des instruments de laboratoire, nous supposons que les couples à transmettre sont toujours faibles.

MANCHONS D'ACCOUPLEMENT

L'entrainement en bout d'arbre au moyen d'un manchon d'accouplement peut s'effectuer avec un jeu très faible de bien des manières. Signalons les plus simples et les plus couramment employées.

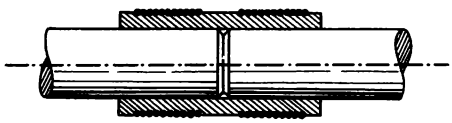


Fig. 46.- Manchon d'accouplement par tube de caoutchouc à vide.

Si l'alignement géométrique des arbres était réalisé d'une façon parfaite, un manchon métallique quelconque pourrait évidemment être employé. Nous supposons que cet alignement n'est pas rigoureux.

Supposons qu'il ne soit pas nécessaire d'assurer un synchronisme angulaire parfait entre les deux pièces tournantes.

On pourra, dans bien des cas, se contenter d'utiliser comme manchon un simple tube de caoutchouc épais (tube à vide); les deux bouts d'arbre seront presque en contact et l'adhérence du caoutchouc sur les arbres sera réalisée par une ligature ou un serrage par collier métallique.

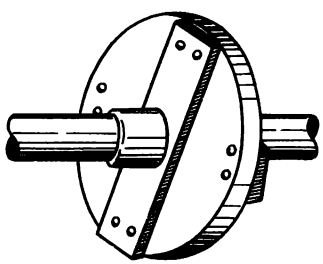


Fig. 47. - Accouplement élastique par toile caoutchoutée.

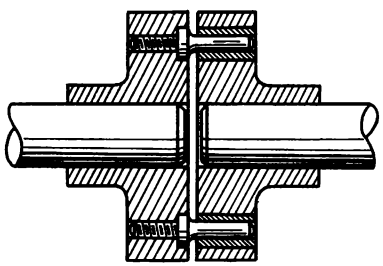


Fig. 48.- Manchon d'accouplement par doigts et tubes de caoutchouc.

Un montage élastique très simple conduisant à un jeu angulaire plus faible entre les deux parties tournantes comporte l'emploi d'un disque assez épais en toile caoutchoutée auquel se trouvent fixées, en croix, deux pièces métalliques rendues solidaires des extrémités des deux arbres à entrainer.

Signalons également l'entrainement par manchon présentant deux ou plusieurs doigts engagés dans des logements garnis intérieurement de tube caoutchouc, appartenant au deuxième plateau de l'accouplement.

Enfin, un accouplement non élastique, entièrement mécanique, est réalisé dans le joint de Oldham qui est à recommander lorsque l'on désire obtenir exactement la même vitesse angulaire instantanément entre les deux arbres tournants.

Le joint de Oldham est constitué par deux plateaux présentant deux cannelures diamètrales de section rectangulaire. Ces deux plateaux sont liés par un disque intermédiaire présentant sur chaque face en surépaisseur une bande de section rectangulaire s'engageant exactement dans les logements des deux disques. Ces deux pièces d'entrainement sont placées à 90° l'une de l'autre.

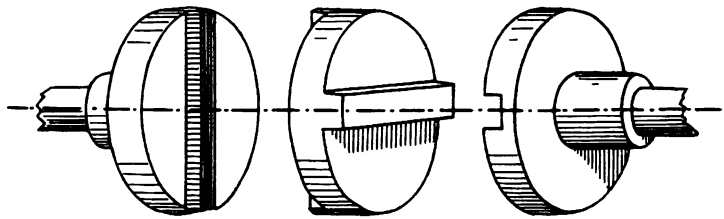


Fig. 49.- Joint de Oldham.

Dans ces conditions, l'entrainement des deux arbres est assuré même dans le cas où ceux-ci sont fortement décentrés grâce au glissement continu de la pièce intermédiaire.

On peut éviter tout bruit désagréable en choisissant cette dernière en fibre ou mieux en textolite (toile bakélisée), en polissant convenablement les faces d'entrainement et en donnant le minimum de jeu compatible avec un bon glissement.

COURROIES

L'emploi de la courroie est généralement limité à l'entrainement de deux machines techniquement indépendantes et rarement à celui de deux organes d'un même instrument en raison du glissement inévitable de la courroie sur les poulies d'entrainement.

Ce glissement est diminué par l'emploi d'adhésif, de surfaces de frottement sur les poulies aussi grandes que possible, par augmentation soit des diamètres des poulies soit de l'angle d'enroulement. Le galet tendeur est souvent utilisé et une des poulies est bombée pour éviter la chute continuelle de la courroie.

L'emploi de courroies de section trapèzoidale évite ce grave inconvénient et permet également de se libérer de la nécessité d'assurer une tension toujours convenable.

Mais l'inconvénient de la courroie caoutchoutée trapèzoidale réside dans sa raideur empêchant son utilisation pratique dans les petites dimensions.

L'industrie fournit également des courroies plates, minces, sans fin, ainsi que des courroies rondes également sans fin qui peuvent être très utiles.

Chaînes.

On utilise quelquefois l'entrainement par chaînes en remplacement de la courroie lorsqu'on veut éviter tout glissement.

Ce mode d'entrainement peut rendre de grands services à condition d'employer de très bons modèles de chaînes très souples comme la chaine Galle ou la chaine à dents.

ENGRENAGES

L'entrainement d'organes tournants par roues dentées est si couramment employé dans les appareils de laboratoire que, sans entrer dans les détails des tracés des engrenages et des procédés de taille industrielle, il n'est pas inutile de fournir quelques renseignements fondamentaux permettant de les exécuter correctement dans un atelier de mécanique possédant une fraiseuse du type universel munie d'un diviseur.

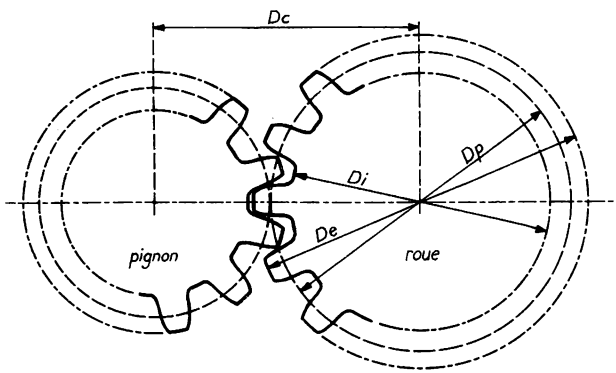


Fig. 50. - Engrenage droit.

Pratiquement, on utilise quatre types particuliers d'engrenages :

- les engrenages droits cylindriques,
- les engrenages hélicoidaux,
- les vis tangentes et roues dentées,
- les engrenages côniques.

Engrenages droits.

Rappelons les principales notions intéressant les engrenages :

Les deux roues d'un train : "pignon" pour la plus petite et "roue" pour la plus grande, sont caractérisées par leur diamètre primitif :

Ces diamètres primitifs correspondant aux circonférences fictives qui roulent sans glissement l'une sur l'autre quand les engrenages tournent. Désignons par N le nombre de dents d'une roue.

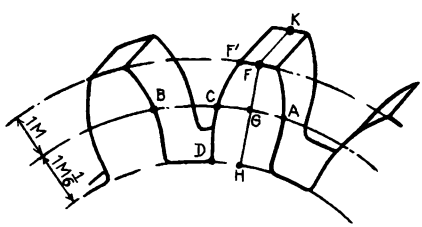


Fig. 51. - Caractéristiques des dents d'un engrenage droit.

Par : **De** le diamètre extérieur,

Dp le diamètre primitif,

Di le diamètre à fond de dents,

Dc la distance des centres.

La longueur des dents est FK.

La face d'une dent est l'arc F'C et le flanc . . . . . l'arc CD.

FG est la hauteur de la face ou saillie.

GH la hauteur du flanc ou creux.

FH la hauteur totale.

Le pas circonférenciel P est le quotient de la circonférence primitive par le nombre de dents - c'est l'arc AB.

Depuis plusieurs années, on remplace presque universellement la notation de "pas" par celle de "module" qui est obtenue en divisant le diamètre primitif exprimé en millimètres par le nombre de dents :

$$M = \frac{Dp}{N}$$

De plus, on emploie presque exclusivement la denture à développante de cercle dont l'avantage du profil réside dans ce fait que toutes les dents d'un même module engrènent entre elles quel que soit le nombre de dents du pignon.

Dans le système actuel, on adopte comme hauteur de face de la dent la valeur du module.

On a donc De = M (N + 2).

La hauteur de la dent est d'autre part égale à M (2 + 1/6).

D'où, pour le diamètre intérieur Di = M (N - 2,17) environ.

La distance des centres a pour valeur : $Dc = M = \left(\frac{N+N'}{2}\right)$

L'angle de pression ou angle formé par la tangente du cercle primitif et la normale à la courbe de la denture au point où celle-ci coupe le cercle primitif est de l'ordre de 20°.

Industriellement, la taille s'effectue généralement par roulement à l'aide d'une vis mère, mais, dans un atelier non spécialisé, on taille les engrenages au moyen de fraises de forme.

Les fraises d'un même module destinées à la taille des engrenages devraient varier de forme de profil suivant le nombre de dents à tailler, mais pratiquement, on emploie, jusqu'au module 10, une série de huit fraises seulement par module, et à partir du module 11 une série de quinze fraises.

Les modules les plus communément employés en instrument de laboratoire sont les modules 0,5 - 0,75 - 1 - 1,25 - 1,75 et 2. et le nombre minimum de dents du pignon est de 12.

Remarque importante :

L'emploi des engrenages droits cylindriques conduit, principalement lorsque le pignon est de petit diamètre, à une légère variation de la vitesse de rotation de la roue menée en rapport avec

le nombre de dents du pignon. On s'aperçoit nettement de cette irrégularité périodique lorsqu'on fait un enregistrement photographique sur un film entrainé par un train d'engrenages présentant ces caractéristiques. On "sent" les dents. Pour obvier à cet inconvénient, on peut sans exécuter une taille hélicoïdale, fraiser les deux roues (supposées de faible épaisseur), non pas parallèlement à leur axe, mais légèrement en biais (l'une à droite et l'autre à gauche). Mais il est préférable d'effectuer une taille hélicoïdale.

Les crémaillères ainsi taillées sont plus douces que les crémaillères à taille droite, mais elles provoquent une poussée latérale dont il faut se méfier.

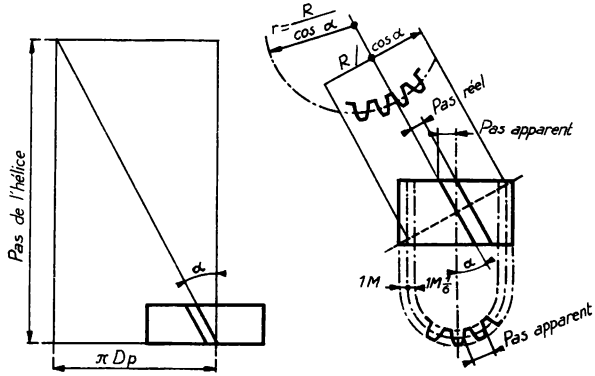


Fig. 52.- Développement d'un engrenage hélicoïdal.

Engrenages hélicoïdaux.

La taille hélicoïdale est extrêmement intéressante, car elle permet d'effectuer des renvois de mouvements circulaires dans un rapport quelconque des vitesses en restant maître de l'angle existant entre les deux axes.

Les engrenages hélicoïdaux donnent d'autre part une résistance plus élevée, ainsi qu'une conduite beaucoup plus douce que les engrenages droits.

Cette taille hélicoïdale est évidemment plus compliquée que la taille droite puisqu'elle demande une liaison effectuée par roues dentées, entre la rotation de la roue à tailler montée sur le diviseur et l'avance de la table de la fraiseuse suivant l'axe de cette roue; ce qui détermine le pas de l'hélice. La fraise est, d'autre part, inclinée suivant l'angle de l'hélice et on dégrène le plateau diviseur en le tournant à la main de l'angle correspondant au nombre de dents.

On distingue dans les engrenages hélicoïdaux le "module apparent" qui est égal au diamètre primitif divisé par le nombre de dents :

$$Ma = \frac{Dp}{N}$$

et le module réel qui a pour valeur $Mr = Ma \times \cos \alpha$.

Pour utiliser les mêmes fraises que pour les engrenages droits, on adopte pour le module réel une valeur exprimée en nombres entiers ou une fraction simple pour les petites dimensions.

On obtient donc comme valeur du diamètre primitif :

$$Dp = N \times \frac{Mr}{\cos \alpha}$$

et

$$De = Dp + 2\,Mr = Mr\left(\frac{N}{\cos \alpha} + 2\right)$$

Le diamètre à fond de dents est :

$$Di = Dp - 2\,Mr\left(1 + \frac{1}{6}\right) = Mr\left(\frac{N}{\cos \alpha} - 2{,}34\right)$$

Comme le pas de l'hélice a pour valeur :

$$Pa = \frac{\pi\, Dp}{tg\, \alpha}$$

connaissant Pa, N et α on peut calculer facilement Dp et Mr.

Pour deux engrenages hélicoïdaux engrenant ensemble, le module réel est le même, mais le module apparent de chaque engrenage dépend de l'angle que fait son hélice avec son axe.

Pour le même module Mr on a :

Pour la première roue ..... $Ma = \frac{Mr}{\cos \alpha}$

Pour la deuxième ..... $M'a = \frac{Mr}{\cos \alpha'}$

$\alpha + \alpha'$ égale l'angle des axes des engrenages.

Pour des engrenages à axes perpendiculaires ($\alpha + \alpha' = 90°$) on obtient :

$$Dc = \frac{Ma\,N}{2} + \frac{M'a\,N'}{2} = \frac{Mr}{2}\left(\frac{N}{\sin \alpha'} + \frac{N'}{\cos \alpha'}\right)$$

Pour des engrenages à axes parallèles $\alpha = \alpha'$ on obtient :

$$Dc = \frac{Mr}{\cos \alpha}\left(\frac{N + N'}{2}\right) = Ma\left(\frac{N + N'}{2}\right)$$

On calcule généralement un engrenage hélicoïdal en faisant varier l'angle α de manière à obtenir pour une distance de centres donnée Dc et un module réel donné Mr des nombres N et N' entiers.

Il faut remarquer d'autre part que les diamètres primitifs d'une roue et d'un pignon constituant un engrenage hélicoïdal ne sont proportionnels au nombre des dents que lorsque les axes sont parallèles.

Remarque particulière :

Signalons que pour un engrenage hélicoïdal, la fraise à employer est bien de même module que le module réel de l'engrenage, mais qu'elle est choisie d'après des conditions théoriques trop

longues à expliciter d'un numéro correspondant à un nombre de dents plus grand que N, tel que :

$$N_1 = \frac{N}{\cos^3 \alpha}$$

Industriellement, cette taille, comme celle des engrenages qui vont être indiqués, est effectuée au moyen de fraises de forme ou de vis-mères par roulement assurant automatiquement la taille au profil théorique.

Vis tangentes et roues dentées.

On peut définir l'engrenage à vis tangente ou vis sans fin un engrenage dans lequel la face utile de la roue est courbée pour épouser la forme de la vis et toute la largeur de la face de la roue est en contact avec celle-ci.

Cet engrenage est réservé aux fortes démultiplications de vitesse et n'est pas réversible. La vis peut être à filets simples ou à filets multiples si l'on ne désire pas une démultiplication par trop forte.

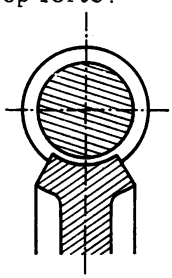


Fig. 53.- Roue Dentée et vis tangente.

La seule manière théoriquement correcte de tailler une roue dentée est d'employer une vis mère ayant les mêmes caractéristiques que la vis tangente, convenablement fraisée, et de descendre progressivement cette vis mère dans la gorge de la roue en reliant ces deux pièces par les engrenages nécessaires.

Pratiquement, dans un atelier de mécanique non spécialisé, on pourra dégrossir la taille de la roue dentée à l'aide d'une fraise de forme ayant un même diamètre que la vis tangente ou à l'aide d'un simple outil de forme remplaçant la fraise.

On donnera à l'axe de la roue pendant la taille l'angle correspondant à celui de l'hélice par rapport à l'arbre support de l'outil. Si l'épaisseur des dents est faible devant le diamètre de la roue, on pourra se contenter de prendre l'angle moyen de l'hélice. Mais dans le cas contraire, on descendra progressivement la taille en changeant l'inclinaison de l'axe de la roue (3 ou 4 opérations avec des angles croissants, par exemple, chaque changement d'angle étant effectué après avoir réalisé un tour complet de la roue).

La taille de la roue est ainsi dégrossie. On doit la terminer par rodage en utilisant une vis mère analogue à la vis tangente mais convenablement fraisée. La forme des dents étant déjà très approchée, il n'est plus nécessaire de relier la roue à la vis par des engrenages convenables. Le rodage se fera sans liaison mécanique, mais à condition de se limiter à des roues de petites dimensions.

Engrenages côniques.

Parmi les différents moyens employés pour tailler les engrenages côniques, nous ne retiendrons que le procédé de taillage à

la fraise, mais il est bien évident qu'on ne peut obtenir ainsi qu'une denture approchée.

La précision dans la forme de la denture est toutefois suffisante à condition que les engrenages aient au moins 25 dents et que la longueur des dents n'excède pas le 1/3 de la génératrice primitive.

Les dimensions des engrenages côniques se calculent en partant du module appliqué au gros bout de la denture.

Supposons le cas le plus fréquent d'un engrenage cônique à 90° :

Soit M le module.

Dp et dp les diamètres primitifs des deux pignons,

De et de leur diamètre extérieur.

N et n leur nombre de dents.

Nous avons :

pour la grande roue : $Dp = N \times M$

$De = Dp + 2\ M \cos \alpha_1$

$$tg\,\alpha_1 = \frac{Dp}{dp} = \frac{N}{n}$$

$$tg\,\beta_1 = \frac{M\,2 \sin \alpha}{Dp} = \frac{2 \sin \alpha_1}{N}$$

pour la petite roue : $dp = n \times M$

$de = dp + 2M \cos \alpha_2$

$$tg\,\alpha_2 = \frac{dp}{Dp} = \frac{n}{N}$$

$$tg\,\beta_2 = \frac{2 \sin \alpha_2}{N}$$

Mais le numéro de la fraise n'est pas déterminé par le nombre réel de dents de la roue, mais d'après le nombre de dents de l'engrenage droit dont le rayon est égal à nm pour la grande roue et nm' pour la petite.

Soient Df, df, les diamètres fictifs et Nf, nf les nombres des dents correspondantes,

On a : $Df = \frac{Dp}{\cos \alpha_1}$

$Nf = \frac{Df}{M} = \frac{N}{\cos \alpha_1}$

$df = \frac{dp}{\cos \alpha_2}$

$nf = \frac{n}{\cos \alpha_2}$

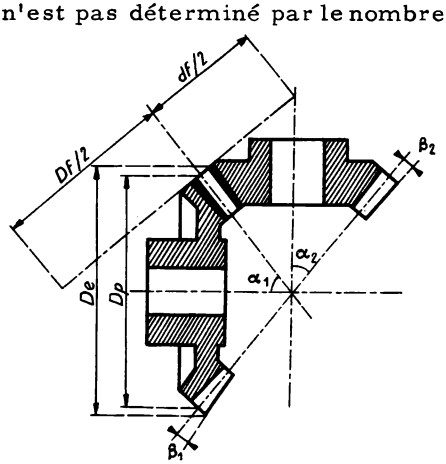


Fig. 54.- Engrenage cônique.

Signalons enfin que pour les modules inférieurs à 10 la série complète des fraises pour un module déterminé comprend les 8 numéros suivants :

N° de la fraise	1	2	3	4
Nombre de dents de l'engrenage à tailler	12 à 13	14 à 16	17 à 20	21 à 25

N° de la fraise	5	6	7	8
Nombre de dents de l'engrenage à tailler	26 à 34	35 à 54	55 à 134	135 à la crémaillère

Il est recommandable pour éviter soit des chocs, soit des bruits exagérés dans le fonctionnement d'un train d'engrenages d'employer une roue en métal et l'autre en un matériau non métallique comme la toile bakélisée ou textolite - quitte à maintenir cette dernière entre deux joues métalliques si la roue paraît trop facilement déformable.

PIÈCES TOURNANTES

Centrage et équilibrage.

Nous avons déjà vu quelques montages de pièces tournantes légères, montage à pivots ou entre pointes, qui ne peuvent plus être employés dès que le corps tournant possède un certain poids.

Or, le problème se pose souvent dans la construction d'instruments de laboratoire de faire tourner sans jeu et sans déséquilibrage, à vitesses très variables, des rotors dont le poids peut être de l'ordre de quelques kilogs.

Quelle solution doit-on adopter pour réaliser les paliers ? Roulements lisses ou roulements à billes ?

Il est incontestable que le roulement à billes assure au rotor un couple résistant très faible et qu'il est nécessaire de l'employer lorsque la pièce tournante doit être extrêmement libre (si on ne peut, en raison de son poids, la monter sur pointes), mais il faut se méfier des roulements à billes, même des meilleurs, car, si leur jeu est généralement négligeable, leur excentricité, par contre, est bien loin d'être nulle et il est courant de trouver des roulements à billes dont l'excentricité dépasse largement 2/100 de millimètre.

Il ne faut donc avoir recours au roulement à billes qu'après un choix sévère des modèles dont on peut disposer, du moins si on désire obtenir une excentricité inférieure à 1/100 de millimètre.

Les roulements à aiguilles sont intéressants lorsqu'interviennent de fortes charges, mais d'après leur principe même de fonctionnement (interposition indispensable d'une mince couche d'huile)

leur jeu est toujours assez considérable même dans les modèles spéciaux qui en présentent le moins possible.

Si l'on veut absolument éviter toute excentricité, il faut avoir recours au palier lisse, l'arbre en acier demi-dur, traité ou non suivant le cas, tournant dans un palier en bronze ou en métal antifriction.

Il est bon, dans ce cas, de prévoir un rattrapage de jeu et d'assurer un graissage convenable du palier.

Une remarque s'impose d'ailleurs. On ne saurait trop, dans tous ces montages et même d'une manière tout à fait générale, s'inspirer de la construction des excellentes machines-outils modernes qui sont, en général, des instruments de haute précision, robustes et facilement maniables.

Il ne suffit pas d'être en possession d'un modèle de palier sans jeu et sans excentricité, il faut de plus s'assurer qu'aucune vibration gênante ne se manifestera pendant la rotation de la pièce tournante, ce qui nécessite un équilibrage préalable de celle-ci.

Sans entrer dans les théories conduisant aux procédés d'équilibrage d'un corps tournant, indiquons simplement qu'il existe deux procédés d'équilibrage : l'équilibrage statique et l'équilibrage dynamique.

L'équilibrage statique doit être uniquement réservé aux rotors dont la longueur, suivant l'axe de rotation, est faible devant son diamètre, c'est à dire aux poulies, volants, disques minces, hélices, etc. En aucun cas, il ne doit être effectué pour un rotor dont la longueur est importante devant son diamètre, car un équilibrage effectué statiquement pour une telle pièce tournante risquerait d'introduire en marche un déséquilibre dynamique beaucoup plus grave que le déséquilibrage statique qu'on a voulu supprimer.

Il existe industriellement des machines à équilibrer statiquement, mais pratiquement on peut se contenter de deux modèles très simples, faciles à construire dans tout atelier de mécanique, même modeste. Ce sont

1° Les rails de niveau, d'une part, trop connus pour qu'il soit utile d'insister, mais instrument peu sensible, même si les arêtes sont bien vives.

2° La machine à disques, constituée comme suit :

Le rotor à équilibrer repose sur quatre disques montés sur de bons roulements à billes (ou entre pointes) se recoupant deux à deux.

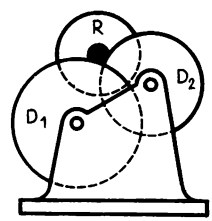


Fig. 55. - Machine simple à disques pour équilibrage statique.

Sous l'effet du balourd du rotor, celui-ci se met à tourner en entrainant les disques et se place dans une position telle que la masse de déséquilibrage se trouve vers le bas à la verticale.

Quelques retouches effectuées en enlevant de la matière dans la direction de la masse de déséquilibrage permettent d'obtenir rapidement un équilibrage convenable.

L'équilibrage dynamique d'un rotor tournant à grande vitesse est beaucoup plus important à réaliser. Il est basé sur les principes suivants. Supposons qu'un disque présentant un balourd soit monté sur des paliers élastiques ne lui permettant qu'un mouvement d'oscillation dans le plan horizontal.

Pendant sa rotation et, suivant la vitesse du disque, le système ainsi constitué va osciller en présentant des amplitudes plus ou moins grandes dans le plan horizontal. En approchant progressivement un marqueur quelconque du rotor tournant, on le touchera en un point déterminé (ou plus exactement sur une portion de circonférence) dont la position variera par rapport à celle qu'occupe le balourd en fonction de la vitesse. Le maximum d'amplitude se produit à la résonance au moment où le nombre de tours par seconde correspond à la fréquence propre d'oscillation du système rotor-bâti-paliers dans le plan horizontal.

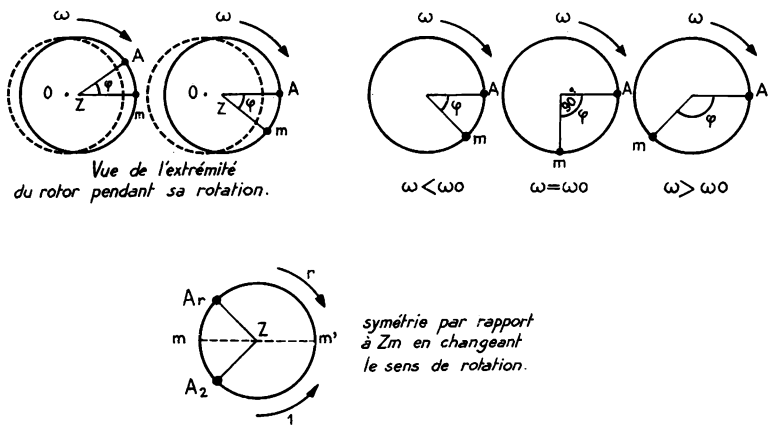


Fig. 56.- Principe de l'équilibrage dynamique.

Si le disque tourne à faible vitesse, en dessous de cette vitesse de résonance, le marqueur touchera le disque en rotation en un point dont la position fera un angle aigu avec la position de la masse en déséquilibrage.

A la vitesse de résonance, cet angle sera de 90°. Pour une vitesse supérieure à celle de résonance, l'angle sera supérieur à 90°. Pour avoir la position du balourd, il suffit donc de faire tourner dans un sens le disque à une vitesse par exemple supérieure à celle de la résonance, de marquer le point de touche A_1, puis de faire tourner le disque dans le sens contraire, à la même vitesse, et de marquer le nouveau point de touche A_2.

Le balourd est situé sur la bissectrice de l'angle opposé $A_1 Z A_2$. On enlèvera donc une certaine masse suivant cette direction et on recommencera l'opération jusqu'à suppression (presque complète) des oscillations.

Le même équilibrage dynamique s'effectue pour un rotor quelconque en partant de ce principe que l'on peut toujours éliminer un déséquilibrage quelconque (statique ou dynamique) en incorporant

deux masses (ou en les enlevant) dans deux plans déterminés à l'avance. On choisit généralement les flancs du rotor.

Cette méthode d'équilibrage est facile à réaliser par des moyens de fortune et évite l'achat de machines industrielles d'un prix élevé. On monte le rotor à équilibrer, dont les plans d'équilibrage ont été choisis aux extrémités en π_1 et π_2 sur les paliers (à billes, par exemple) d'un berceau, placé lui même sur des ressorts ou des rondelles de caoutchouc.

On fixe d abord le berceau en AB de manière à déterminer un axe horizontal d'oscillations, situé dans le plan d'équilibrage π_1 et on équilibre dans le plan π_2, comme il a été indiqué ci-dessus en plaçant le traceur verticalement vers le haut et en faisant tourner le rotor dans les deux sens exactement à la même vitesse.

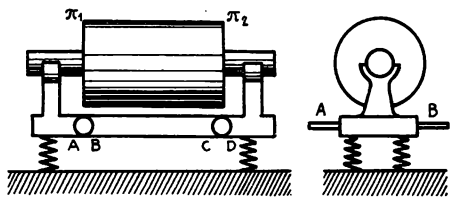


Fig. 57.- Machine simple pour équilibrage dynamique.

Puis, une fois les vibrations en π_2 supprimées, on fixe le berceau en CD et on effectue l'équilibrage dans le plan π_1, toujours suivant les mêmes principes. Cette opération terminée, le rotor est complètement équilibré.

Un dispositif optique très simple réalisé par un miroir concave, collé sur le berceau, convenablement éclairé par un filament de lampe dont l'image se reforme sur une échelle graduée permet de contrôler l'amplitude des vibrations.

Amortissement des oscillations et des vibrations.

On sait que pour obtenir un retour au zéro aussi rapidement que possible d'un instrument de mesure mécanique ou électrique, on doit donner au système oscillant servant d'indicateur de mesure un amortissement légèrement inférieur - mettons les 9/ 10 - à l'amortissement critique.

Dans le cas ou l'appareil doit détecter ou enregistrer des phénomènes périodiques, cet amortissement doit être amené aux 6 à 7/ 10 seulement de l'amortissement critique.

Pour réaliser l'amortissement convenable, on dispose de trois procédés différents - l'amortisseur par frottement sec étant à éliminer.

1° L'amortissement par huile très efficace mais qui est à rejeter à moins de travailler à température sensiblement constante en raison de l'énorme variation de coefficient de viscosité des huiles en fonction de la température.

2° L'amortissement par courants de Foucault.- Cet amortisseur bien connu a le grand avantage de pouvoir être utilisé pour tous les mouvements de translation et de rotation. Il est constitué par un disque ou une palette en métal de résistivité aussi faible que possible (cuivre ou mieux aluminium enraison de sa légèreté)

se déplaçant entre les pôles d'un ou de plusieurs aimants susceptibles de fournir un fort champ magnétique.

Le coefficient d'amortissement pour un système linéaire a pour valeur :

$$f = \frac{H^2 V}{k \rho}$$

f coef. d'amortissement en c.g.s. H champ en gauss.
V volume du métal utile dans l'entrefer, ρ résistivité du métal; k coef. dépendant de la forme des aimants et de la surface utile de la palette (K voisin de 2 en première approximation).

La valeur du champ intervenant au carré, on doit employer de bons aimants (ceux-ci étant à circuit presque fermé peuvent être réalisés en acier au cobalt) donnant comme ordre de grandeur des intensités de champ de 3 à 5.000 G).

L'emploi d'un électro-aimant susceptible de fournir des intensités de champ de 12 à 15.000 G. dans un entrefer de quelques millimètres peut être envisagé si le poids de l'instrument et l'énergie électrique consommée ne représentent pas des facteurs prohibitifs.

3° L'amortissement par air.- Très utilisé dans les appareils de mesures électriques, son emploi peut être étendu à l'amortissement de systèmes mécaniques en lui donnant la forme préconisée par Curie dans ses amortisseurs de balance, soit : un cylindre mobile se déplaçant à une très faible distance d'un cylindre, fixe, un des fonds étant fermé.

Si on désigne par η le coefficient de viscosité de l'air et par r le rayon moyen des cylindres, l leur longueur utile, e la distance les séparant, le coefficient d'amortissement pour un système linéaire est donné par :

$$f = \frac{6 \pi \eta l r^3}{e^3}$$

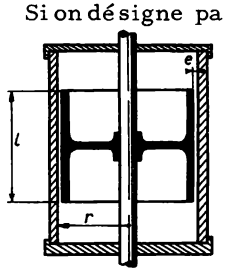


Fig. 58.- Amortisseur à air.

Malgré la faible valeur de r (18.10^{-5} au lieu de mettons 10 en moyenne pour l'huile) la valeur du coefficient d'amortissement obtenu peut encore être très importante en raison des puissances cubiques (r^3 et e^3).

On utilise généralement des valeurs de l et de r de quelques centimètres et des valeurs de e de l'ordre de 1/10 de millimètre.

L'inconvénient réside dans le fait que ce système ne peut être utilisé que pour des mouvements linéaires ou pendulaires de faible amplitude et que la construction est délicate en raison de la faible valeur de e, mais cet amortisseur présente de très gros avantages. Il peut être léger si l'on a soin d'utiliser un alliage à l'aluminium ou mieux du magnésium et le coefficient d'amortissement obtenu est pratiquement indépendant de la température et de la pression.

Etouffeurs de vibrations.

Sans insister sur les dispositifs connus de supports antivibrateurs destinés à recevoir des appareils très sensibles comme les

galvanomètres et qui sont généralement constitués par une suspension trifilaire pendue au plafond, munie de dispositifs élastiques (très souples) et quelquefois également d'amortisseur (palette dans l'huile, par exemple) ou basés sur des systèmes de suspensions astatiques, indiquons rapidement les principes sur lesquels sont établis les étouffeurs de vibrations.

Nous voulons éviter que les vibrations provenant du sol ne soient transmises à un appareil dont le principe de fonctionnement et les organes réalisés nécessitent une très grande fixité (inscripteur à plume ou à miroir, instrument d'optique utilisant des interférences, par exemple).

La théorie montre que lorsqu'un ensemble constitué par un système lié élastiquement à un support quelconque est soumis à des vibrations, celles-ci seront transmises du support au système qui lui est lié dans un rapport d'autant plus faible que la fréquence propre d'oscillations du système lié élastiquement au support sera plus petite par rapport à la fréquence des vibrations imposées.

Il faut donc monter ou suspendre l'appareil élastiquement par rapport au support de manière à lui imposer une période propre d'oscillations très longue par rapport à celle des vibrations, en pratique au moins cinq fois plus longue. Par exemple, si la fréquence des vibrations du support (ou du sol) est de 50, il faudra monter l'appareil sur des ressorts ou sur des caoutchoucs de manière à lui donner une fréquence propre d'oscillations par rapport au support, de 10 par seconde. Dans ce cas, le rapport de transmission des vibrations en amplitude sera de l'ordre de 1/25. S'il est possible de descendre la fréquence des oscillations à 7, ce rapport tombe à 1/50. Et ceci sans introduire de coefficient d'amortissement quelconque (qui serait au contraire nuisible).

Le coefficient d'amortissement supplémentaire fourni par un amortisseur quelconque ne se justifierait que dans le cas où l'appareil possédant des organes intérieurs montés eux-mêmes élastiquement et dont la fréquence des oscillations serait voisine de celle des vibrations du support, il serait impossible de donner à l'ensemble de cet appareil en le montant élastiquement sur son support une fréquence beaucoup plus faible que celle des vibrations.

Des étouffeurs de vibrations basés sur le principe des systèmes couplés à deux degrés de liberté peuvent être utilisés dans des cas bien particuliers, mais nécessitent un développement qui sortirait du cadre de ces descriptions sommaires.

RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DE CERTAINS MATÉRIAUX

1° MÉTAUX

	Densité	Module élastique E en kg. poids-mm (multiplier par 10^{11} pour valeur cgs).	Charge de rupture R en kg par mm	Coeff. de dilatation $\times 10^{6}$	Point de fusion
Fer	7,85	20	env. 30	11	1.550°
Acier demi-dur	7,8	22	40 à 60	14	1.150°
Acier fondu		27			
Invar (36 % Ni)		14	60	0	1.470°
Fonte grise	7	12	12	11	1.230°
Cuivre rouge	8,9	12	20 à 25	16	1.080°
Laiton à 33 % Zn	8,4	8	25	18	940°
Bronze à 10 % Sn	8,7	10	25	20	
Bronze Alu 10 %	7,7			16	1.050°
Bronze Béryllium 2%	8,25	13	100 à 140	17	865°
Maillechort	8,3 à 8,6	11			
Alliage de zinc (4% Al. 2 % Cu)	6,8		25		500°
Aluminium	2,7	7	7 à 20	22	660°
Magnésium	1,75	4,2		26	650°
Duralumin	2,8	7,5	40 à 50	24	5 à 600°
Alliage à traitement thermiq. (Cu 4 % Mn 0,5-Mg 0,5 Si 0,6)					
Almasilicium (Mg 0,7-Si 1,5 %)	2,7	12	22 à 24	Caractéristiques très variables suivant composition exacte	
Alpax (Si 13 %)	2,65		17 à 20		
(Alliage de fonderie sans traitement thermique)					

Pour des aciers recuits, la limite élastique peut être prise comme ayant pour valeur environ les deux tiers de la charge de rupture. Pour les aciers trempés, ce rapport monte à 90%.

Quant aux aciers spéciaux, leur nombre est maintenant si grand et leurs qualités mécaniques varient dans de telles proportions en fonction de leur composition et de leur traitement thermique, qu'il est indispensable de demander au fournisseur la marque d'acier répondant le mieux aux conditions de travail imposé.

A titre indicatif, signalons comme aciers spéciaux :

L'acier rapide (à 18 % de tungstène plus des traces de chrome, de vanadium et de carbone) utilisé couramment comme acier à outil.

Un acier nickel-chrome, dont la charge de rupture est de 75 kg à l'état recuit à 725° et 90 kg trempé à l'huile à 800° suivi d'un revenu à 675° - utilisé pour la construction des pièces telles que vilebrequins, arbres et certains engrenages.

Un autre acier nickel-chrome : charge de rupture 75 kg recuit à 750° et 90 kg trempé à l'air à 850° et revenu à 200° (fabrication d'engrenages).

Enfin, l'acier chrome - molybdène - charge de rupture 85 kg, recuit à 675° et 175 kg trempé à l'huile à 825° revenu à 200°, utilisé pour des pièces de grande fatigue, etc.

Traitement thermique.- On ne saurait trop insister sur la nécessité d'effectuer un traitement thermique parfaitement contrôlé de ces aciers si l'on veut obtenir les caractéristiques indiquées. Il est parfaitement inutile d'employer des aciers spéciaux si l'on ne dispose pas de l'instrumentation de traitement thermique, les températures de trempe devant parfois être observées avec des écarts inférieurs à 25°.

Le traitement thermique de ces aciers nécessite donc un four convenable, électrique ou à gaz, muni d'un contrôleur de température (couple thermoélectrique ou pyromètre) et d'un banc de trempe ainsi que de revenu dont la température doit également être parfaitement connue.

2° ISOLANTS INDUSTRIELS

Ebonite : Bon isolant, mais très déformable à la chaleur, charge de rupture 0,7 kg par mm (traction), 12 kg à la compression.

Bakélite : Poudre agglomérée à l'amiante) densité 1,9, charge de rupture : 1,5 à la traction, 15 à la compression; coefficient de dilatation 1.10^{-5}

Carton bakélisé : Panneaux isolants peu déformables.

Textolite (toile bakélisée) : isolant très solide, indéformable (peut servir à faire des engrenages).

3° ISOLANTS ÉLECTROMÉTRIQUES

Stéatite : Densité 2,7. Charge de rupture 5 à 7 à la traction, 90 à la compression; se travaille à la meule.

Mycalex : Densité 3 environ. Se scie et se perce facilement, mais se délite. A utiliser en plaque ou moulé. Se polit à la meule.

Quartz : Densité 2,2. Module élastique 8.10^{11}. Charge de rupture 5 à la traction. > 20 à la compression. Très bon isolant mais hygrométrique.

Plexiglas : Bon isolant électromètrique.

Ambroine (ambre comprimé).- Excellent isolant électrométrique. Coefficient de dilatation important. Se travaille à l'alcool.

Polystyrène et Polyéthylène.- Excellents isolants. Tangente d'angle de pertes à 10^6 cycle/s très faible : 2 à 5.10^{-4}. Constante diélectrique 2,7.

Téflon.- Caractéristiques d'isolement au moins équivalentes. Constante diélectrique 2,0. Coefficient de frottement très faible.

DÉFORMATIONS DES PIÈCES

On ne saurait trop attirer l'attention sur les déformations de pièces pouvant résulter soit d'un travail moléculaire très lent du métal, soit des variations de température.

Les déformations spontanées sont particulièrement difficiles à prévoir et elles ne peuvent être généralement combattues que par des recuits successifs dans des conditions de température et de durée dépendant essentiellement de la nature du métal.

L'usinage de vis calibrées, la rectification de barres d'acier nécessitent souvent plusieurs traitements thermiques avant d'effectuer la passe finale, le métal se déformant légèrement à chaque passe d'usinage.

Les déformations normales des pièces dues à leur élasticité sont, par contre, faciles à prévoir et à combattre en les dimensionnant convenablement et surtout en les profilant et les nervurant comme il a été spécifié précédemment.

A titre d'indications, le tableau ci-dessous fournit quelques valeurs de flèches obtenues pour des solides de section uniforme.

E désigne toujours le module élastique,

I moment d'inertie des sections,

ρ masse spécifique du métal.

Barre articulée ou appuyée à ses deux extrémités :

$$\text{Flèche } f = \frac{FL^3}{48\,EI}$$

Pour une barre de section rectangulaire :

$$I=\frac{ae^3}{12}\ ,\ f=\frac{1}{4}\ \frac{FL^3}{Ea\,e^3}$$

Pour une barre cylindrique :

$$I=\frac{\pi r^4}{4}\ ,f=\frac{1}{12\pi}\ \frac{FL^3}{Er^4}$$

F valeur de l'effort appliqué au milieu de la barre,
L longueur, a largeur, e épaisseur,
r rayon de la section droite.

Fréquence propre d'oscillations :

$$\nu_k=k^2\frac{\pi}{2}\ \frac{1}{L^2}\sqrt{\frac{EI}{\rho s}}\ \text{avec}\ k=1,2,3,\text{etc.}$$

Soit pour une barre rectangulaire :

$$\nu_k=k^2\,0{,}45\,\frac{e}{L^2}\sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

et pour une barre cylindrique :

$$\nu_k=k^2\,0{,}78\,\frac{r}{L^2}\sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Barre encastrée à une extrémité, libre à l'autre : F exercée à l'extrémité libre.

$$f=\frac{FL^3}{3EI}$$

Pour une barre de section rectangulaire :

$$f=\frac{4FL^3}{Eae^3}$$

Pour une barre cylindrique :

$$f=\frac{4}{3\pi}\ \frac{FL^3}{Er^4}$$

Fréquence propre d'oscillations :

$$\nu_k=\frac{k^2}{2\pi}\ \frac{1}{L^2}\sqrt{\frac{EI}{\rho s}}\ \text{avec}\ k=1{,}87,\ 4{,}7\ ,\text{etc.}$$

Première fréquence propre :

$$\nu=0{,}55\,\frac{1}{L^2}\sqrt{\frac{EI}{\rho s}}$$

Soit : pour une barre de section rectangulaire :

$$\nu=0{,}16\,\frac{e}{L^2}\sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

pour une barre cylindrique :

$$\nu=0{,}28\,\frac{e}{L^2}\sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Barre encastrée à ses deux extrémités : F exercée au centre.

$$f=\frac{1}{4\times48}\frac{FL^3}{EI}$$

Pour une barre rectangulaire :

$$f=\frac{1}{16}\frac{FL^3}{Eae^3}$$

Pour une barre cylindrique :

$$f=\frac{1}{48\pi}\frac{FL^3}{Er^4}$$

Première fréquence propre :

$$\nu=7{,}1\,\frac{1}{L^2}\sqrt{\frac{EI}{\rho s}}$$

Barre appuyée à ses deux extrémités uniformément chargée. Q étant la charge totale.

$$f=\frac{5}{384}\frac{QL^3}{EI}$$

Barre ecastrée à une extrémité. Q charge totale uniformément répartie.

$$f=\frac{1}{8}\frac{QL^3}{EI}$$

Barre encastrée à ses deux extrémités, Q charge uniformément répartie.

$$f=\frac{1}{384}\frac{QL^3}{EI}$$

Membrane circulaire supportant une pression uniforme P.

$$f=\frac{3}{16}(1-\sigma^2)\frac{P}{E}\frac{r^4}{e^3}$$

σ coefficient de Poisson; pour l'acier :

$$f=0{,}175\,\frac{P}{E}\frac{r^4}{e^3}$$

Première fréquence propre d'oscillations :

$$\nu_0=\frac{\sqrt{20}}{3\pi}\frac{e}{r^2}\sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}}$$

Pour l'acier :

$$\nu_0=0{,}45\sqrt{\frac{E}{\rho}\frac{e}{r^2}}$$

Rabotage.

Supposons que nous ayions à travailler une pièce de fonderie : un socle en fonte, par exemple.

Suivant les dimensions et l'outillage dont on dispose, on pourra travailler les surfaces à dresser, soit à l'étau limeur (pièce fixe, outil mobile), soit à la raboteuse (outil fixe; pièces de grandes dimensions, mobiles).

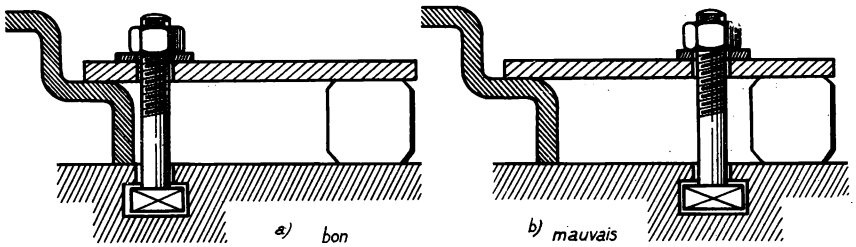


Fig. 59.- Fixation d'une pièce sur une table de raboteuse ou de fraiseuse.
a) Bon. b) Mauvais.

Dans l'un comme dans l'autre cas, l'outil est semblable à celui qui est utilisé dans le travail au tour et la même précaution fondamentale est à prendre : engager l'outil sous la croûte constituant la surface de la pièce de fonderie; ne jamais prendre la première passe en léchant la pièce, ce qui aurait pour effet d'abimer très rapidement le tranchant de l'outil, la croûte du métal étant toujours très dure et souvent garnie de grains de sable.

La pièce est fixée sur la table de la machine au moyen de butées, de valets ou de brides et de boulons. Dans ce cas, il faut avoir soin de placer les boulons de fixation très près de la pièce suivant le montage *a* et non suivant *b* comme on le voit trop souvent réalisé. Cette remarque est évidemment valable pour la fixation d'une pièce sur une table de machine-outil quelconque : fraiseuse, par exemple.

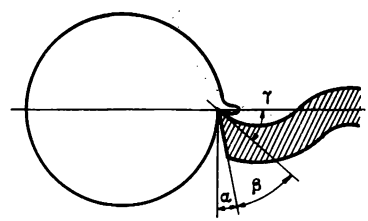


Fig. 60.- Angles caractéristiques des outils de tour : dépouille α coupe β dégagement γ

Tour

Les formes d'outils et les vitesses de coupe à l'étau-limeur restent semblables à celles des outils de tour; en voici les données principales :

La forme des outils est caractérisée par trois angles :

- L'angle d'incidence appelé aussi angle de dépouille α dont la valeur est comprise entre 3 et 6 degrés.

- L'angle de coupe β ou (taillant) est très variable suivant la dureté du métal à usiner et d'une manière générale, il augmente

avec la dureté de ce métal. Il est voisin de 85° pour les métaux très durs et diminue jusque vers 45° pour les métaux tendres.

Métal travaillé	Angle de coupe
- Fonte en coquille et acier trempé	85°
Acier dur	80°
Fonte grise	70°
- Bronze et acier demi-dur	65°
Acier doux	60°
Laiton	55°
Cuivre	50°
- Aluminium et antifriction	45°

L'angle γ, dénommé souvent angle de dégagement, se déduit évidemment des deux autres.

Cet angle γ, toujours positif avec les aciers à outils ordinaires, est maintenant pris négativement (5 à 10°) avec les aciers aux carbures - ceci dans le cas de travaux à grand rendement. Cette attaque négative nécessite une grande vitesse de coupe et une grande puissance du moteur d'entrainement. La pièce est polie comme si elle était rectifiée.

Cette classification des angles n'est pas universellement adoptée. Pour les dents de fraise notamment, l'angle de coupe est souvent caractérisé par la somme des angles $\alpha + \beta$, β étant l'angle d'affûtage.

Deux autres points sont à envisager : la trajectoire élastique du tranchant de l'outil et sa position par rapport à l'axe de la pièce.

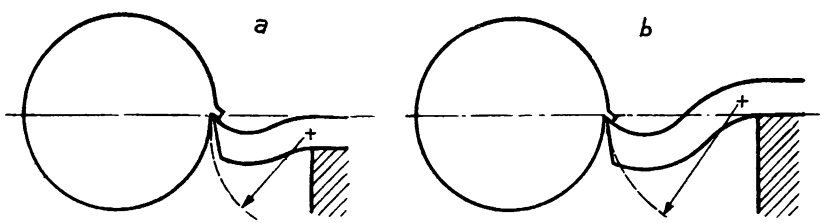


Fig. 61.- Flexion d'un outil de tour.
En a) L'outil s'engage.
En b) Il se dégage.

Pour éviter l'engagement de l'outil dans le métal, il est utile de donner à l'outil une forme telle que son axe de fléchissement se trouve placé au-dessus de l'axe de l'outil.

En a) il est placé au-dessous et l'outil a tendance à pénétrer dans la matière. S'il est très flexible il cassera, s'il est rigide il pourra être utilisé pour de faibles passes et broutera pour les fortes.

En b) l'outil a tendance à se dégager, donc à prendre moins de métal par suite de sa flexion. Si l'outil est très flexible, il broutera encore mais s'il est peu flexible on obtiendra une bonne condition de marche.

Enfin, la position de l'outil par rapport à l'axe de la pièce modifie évidemment l'angle de dépouille. L'outil ne doit jamais se trouver au-dessous de l'axe du tour, mais centré par rapport à cet axe et quelquefois, pour de grosses passes, légèrement au-dessus.

Les formes des outils sont connues, elles se réduisent en gros aux suivantes : outils à dégrossir, outils de côté ou à surfacer, outils à fileter, outils à aléser et outils à tronçonner. Ce dernier généralement étroit (de 1 à quelques millimètres) est dégagé latéralement et est très souvent placé à l'envers dans le porte-outil, le tour tournant également à l'envers de manière à asseoir l'arbre du tour sur son coussinet et non à le lever. On évite ainsi le broutage.

Les outils peuvent, d'autre part, se diviser en deux classes distinctes :

a) Ceux qui sont façonnés en bout pris dans un barreau brut et qui demandent à être reforgés après un certain nombre d'affûtages.

b) Ceux dont le profil est constant et qui sont montés sur un porte-outil spécial (outil droit ou en forme de molette). Ceux-ci sont plus intéressants au point de vue rendement que les outils façonnés en bout mais ils sont plus difficiles et partant plus coûteux à construire.

Nature du métal constituant l'outil :

On utilise couramment des aciers ordinaires dont la teneur en carbone est supérieure à 0,7 % (aciers durs); pratiquement, cette teneur est de l'ordre de 0,8 % à 1,2 %, mais depuis déjà de nombreuses années, on emploie soit des aciers spéciaux au chrome (carbone 0,7 à 1,6 % - chrome 3 à 15 %), soit des aciers rapides contenant du carbone 0,5 à 1,6 %; du chrome 0,5 à 4 %, du tungstène 3 à 20 %, du manganèse 0,1 à 1,5 % et des traces de vanadium. Puis, apparut le stellite, alliage contenant 1,5 % de carbone, 26 % de chrome, 1,5 % de manganèse, 25 % de tungstène et 48 % de cobalt, d'une très grande dureté et ne se travaillant qu'à la meule. Mais cet alliage reste assez fragile et le morceau de stellite formant outil doit être convenablement tenu dans le porte-outil avec le minimum de porte-à-faux.

Le stellite est actuellement remplacé par le carbure de tungstène se meulant mieux, moins fragile, ou mieux encore par des alliages de carbure de tungstène et de carbure de Tantale, ou de Titane, liés par du cobalt ou du nickel (Titanit-Carboram, etc.) et permettant les mêmes vitesses de coupe.

Insistons une nouvelle fois sur la nécessité de contrôler très sérieusement les températures de trempe et de revenu pour obtenir des aciers ordinaires et des aciers rapides toutes leurs qualités d'emploi. Signalons, de plus, que la supériorité des aciers rapides réside dans ce fait, que même porté au rouge sombre, le tranchant de l'outil est encore suffisamment dur pour donner une coupe correcte, d'où la possibilité d'augmenter notablement les vitesses de coupe.

Vitesses de coupe.

Une fois l'outil convenablement trempé et affûté, il reste à envisager les vitesses de coupe ou vitesses linéaires relatives de l'outil par rapport à la surface de la pièce travaillée. Celles-ci sont très variables, elles dépendent de la nature des métaux utilisés comme outil et comme pièce travaillée, de la profondeur de la passe, de l'avance par tour de l'outil, ainsi que de la rigidité du tour, de la forme du tranchant de l'outil, de la lubrification, etc.

Ces vitesses de coupe sont, en pratique, limitées par l'échauffement du tranchant de l'outil. Un outil en acier au carbone se détrempe vers 250°, tandis que ceux en acier rapide peuvent supporter une température de 500 à 600°.

Par contre, le stellite et le carbure de tungstène peuvent être portés à 1.100° sans que leur dureté en soit affectée, ce qui permet des vitesses de coupe environ six fois plus grandes que celles adoptées avec un acier au carbone.

D'autre part, un acier détrempé doit être de nouveau traité tandis que le stellite porté à 1.200° (température correspondant au début du ramollisement du nickel) reprend sa dureté initiale par simple refroidissement.

Un bon jet d'arrosage à l'eau, dirigé directement sur la pièce lorsqu'elle est petite, sur le copeau pour de plus grosses pièces, permet donc d'augmenter la vitesse de coupe de 25 à 30 % pour l'acier; cet arrosage est inutile pour la fonte.

A titre d'indication, voici quelques valeurs de vitesses de coupe pour le travail d'acier demi-dur à 60 kg., profondeur de passe 5 mm. avance par tour 1 mm.

Outil en acier au carbone 3 m. 50 par minute (60 mm. par seconde.

Outil en acier rapide 22 m. par minute (360 mm. par sec.).

Le travail de l'acier doux permettrait dans les mêmes conditions (en changeant les angles de coupe de l'outil) des vitesses de coupe environ doubles - celles-ci pourraient être dix fois plus grandes pour le travail du laiton, cinquante fois plus grandes pour les alliages légers et cent fois plus grandes pour l'aluminium à teneur élevée de sicilium et le bois.

Ces chiffres ne constituent que des ordres de grandeur.

Il faut également signaler l'emploi d'outils au diamant (diamant noir convenablement enchâssé à l'extrémité d'une pièce en acier). Cet outil permet d'effectuer des passes de finition donnant dans un certain cas (bronze notamment) un poli supérieur à celui que l'on peut obtenir par le travail à la machine à rectifier, mais il est coûteux et fragile.

Nous avons quelque peu insisté sur le travail au tour sans donner d'indications sur les tours eux-mêmes, ce qui ne relève pas de cet opuscule, car chaque fois qu'il est possible de le faire, une pièce doit être étudiée sous forme de pièce de révolution, le travail au tour étant celui qui rend le mieux.

Indiquons seulement que le travail obtenu ne peut être précis qu'à condition d'avoir assuré une fixation convenable de la pièce à usiner.

Celle-ci peut être serrée dans un mandrin, mais faut-il encore s'assurer que le mandrin généralement à trois mors tourne parfaitement rond et que son filetage servant à le monter sur le nez du tour soit très propre.

Le serrage d'une pièce sur un plateau nécessite également des précautions particulières. La pièce doit être convenablement calée sur le plateau et serrée, sans exagération, de manière à éviter les déformations. Il faut, de plus, équilibrer le plateau si la pièce n'est pas centrée sur son plateau.

Le tournage entre pointes demande un contrôle sérieux des pointes elles-mêmes. Vérifier, notamment, que la pointe et la contrepointe sont bien dans l'axe du tour. La pièce ne doit pas être trop serrée, ce serrage étant vérifié par la manoeuvre du toc. De plus, il est indispensable de vérifier les points de centre à la loupe et autant que possible de les conserver sur la pièce de manière à pouvoir effectuer des retouches ultérieures.

Enfin, on emploie souvent la fixation des pièces plates difficiles à serrer sur un plateau métallique par collage à l'arcanson (résine jaune ou colophane convenablement chauffée) sur un plateau en bois primitivement bien dressé sur le tour. La difficulté réside également dans la nécessité d'éviter les déformations.

Fraisage.

Une troisième opération courante dans la construction des appareils scientifiques, après le rabotage et le tournage consiste dans le fraisage des pièces, tout atelier de mécanique devant posséder une fraiseuse universelle, dont il existe plusieurs modèles français excellents, permettant de travailler verticalement, horizontalement ou sous une inclinaison quelconque de la fraise.

La fraiseuse permettra non seulement de dresser des surfaces, mais de scier des plaques, de tailler des engrenages (si elle est complétée par un plateau diviseur, accessoire de première nécessité), de fraiser des pièces circulaires, etc.

Nous avons indiqué la manière de fixer convenablement la pièce sur la table de la fraiseuse et indiqué que le tranchant de l'outil, de la fraise dans le cas présent, ne devait pas gratter la croûte, ce qui donne immédiatement le sens de la translation à imposer à la table de la fraiseuse par rapport au sens de rotation de la fraise.

Les formes de fraises sont pratiquement innombrables, mais elles peuvent se classer en deux catégories d'après la forme du tranchant.

1° Les fraises à denture droite qui s'affûtent en rectifiant la face qui forme le sommet de la dent.

2° Les fraises détalonnées ou à profil constant qui s'affûtent en rectifiant la face antérieure de la dent, celle qui est dirigée suivant le rayon de la fraise.

Une fraiseuse doit donc être complétée par une machine à affûter les fraises.

Un autre classement des fraises résulte de la position des dents par rapport à l'axe de la fraise. On distingue ainsi :

a) Les fraises cylindriques dont les dents sont parallèles à l'axe de rotation de la fraise.

b) Les fraises en bout dont les dents sont perpendiculaires à l'axe.

c) Les fraises à denture intérieure.

Dans chacune de ces catégories, on distingue de plus les fraises à dents droites et les fraises à dents hélicoïdales.

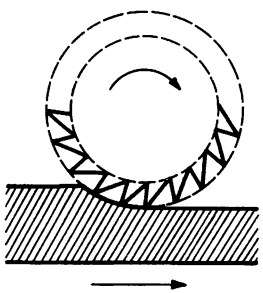


Fig. 62.- Fraisage Sens de l'avance de la pièce par rapport au sens de rotation de la fraise.

Il existe également des fraises pouvant travailler soit latéralement, soit en bout, leur champ d'application est très étendu. Certains modèles peuvent travailler sur trois faces et permettent de défoncer ou de creuser des rainures.

Par contre, les scies épaisses ou fraises à trancher ne travaillent que sur la périphérie.

Un autre type de fraise est caractérisé par le fait que les lames tranchantes sont mobiles et ne nécessitent pas de machines à affûter spéciales. Certains modèles permettent de travailler en bout à l'aide de deux ou quatre lames mobiles, d'autres travaillent cylindriquement (fraisage des surfaces).

Enfin, en plus des fraises à angles généralement utilisées pour tailler d'autres outils (fraises ou tarauds) nous avons déjà signalé les fraises à tailler les engrenages.

Dans bien des cas, il est possible d'accoupler plusieurs fraises sur le même arbre, ce qui permet de dresser simultanément plusieurs surfaces parallèles.

Les vitesses de coupe des fraises sont, comme pour le tour, très variables suivant les facteurs déjà envisagés.

Avec des fraises en acier fondu ordinaire, la vitesse moyenne de coupe est de l'ordre de 15 à 20 mètres par minute avec une avance de 30 mm. pour le fer et l'acier doux.

Pour la fonte grise, la vitesse de coupe est de 10 à 15 mètres et pour le bronze de 20 à 25 mètres.

Les fraises en acier rapide permettent de doubler ces vitesses.

Pour le fraisage du fer et de l'acier, il est recommandé d'arroser abondamment avec de l'eau de savon ou de l'huile.

Par contre, la fonte et le bronze se travaillent à sec.

Les alliages d'aluminium se travaillent également à sec, ou

mieux à l'huile soluble, au mélange de savon de potasse, alcool et eau ou au mélange par moitié d'huile de lard et de pétrole.

Sans insister davantage sur le travail des pièces mécaniques à la fraiseuse, qui rend d'immenses services dans l'atelier de petite et moyenne mécanique que nous envisageons, signalons, toutefois, que le montage de la pièce sur la fraiseuse et l'équipement complet de celle-ci : montage de support de fraise, de la fraise, etc., demandent parfois un temps assez long. Il en résulte que pour le travail de pièces par unité, il y a souvent intérêt à laisser la fraiseuse de côté et à faire usiner la pièce à l'étau à condition de pouvoir la remettre entre les mains d'un bon ouvrier et de se trouver en présence d'un travail relativement simple.

Le travail à la lime, le grattage final d'une pièce sont toujours des opérations à envisager; elles entretiennent la main de l'ouvrier, qui doit savoir de plus calculer son temps de travail et abandonner la fraiseuse lorsque celle-ci ne présente plus un intérêt certain.

Perçage et Rectification.

L'atelier de mécanique doit également posséder au moins deux types de perceuses, une de taille normale et une petite perceuse pouvant travailler à grande vitesse.

Comme pour les opérations précédentes, la vitesse de rotation de la mèche dépendra de son diamètre et de la nature du métal à percer.

D'où la nécessité de disposer d'une perceuse à grande vitesse qui servira à percer des trous de petits diamètre dans des pièces en alliage léger, par exemple.

L'opération de perçage, une fois le trou convenablement pointé, ne souffre pas de difficultés. Il suffit d'affûter soigneusement la mèche de manière à éviter une déviation toujours possible de l'axe du trou, ce qui se produit fatalement lorsqu'on utilise une mèche défectueuse.

L'emploi de calibres munis de canons en acier trempé est à recommander dans le travail en petites séries; on évite ainsi des déviations de la mèche et un traçage répété pour chaque fois.

Les mèches américaines seront avantageusement remplacées par des mèches droites pour le travail du laiton et du bronze et des pièces relativement minces.

Indiquons que l'on peut percer assez facilement des plaques de verre et même de quartz par des moyens de fortune en utilisant simplement une mèche terminée en langue d'aspic pour des diamètres de quelques millimètres ou un tube encoché pour des diamètres plus forts exécuté en fer doux en se servant comme abrasif de poudre de carborundum assez fine, le tout baignant dans une quantité suffisante d'eau alcaline ou d'essence de térébenthine. Il y a intérêt à percer la pièce par retournement pour éviter d'éclater à la sortie de la mèche.

Reste à envisager le travail de rectification.

Il ne fait aucun doute que la rectifieuse est une machine-outil très utile, mais dont l'emploi est loin d'être aussi courant que celui

d'un tour ou d'une fraiseuse, de plus son prix est élevé. Ce n'est donc pas une machine absolument indispensable dans l'atelier de mécanique.

Signalons simplement que ces machines se présentent pratiquement sous deux formes bien différentes :

a) La machine à rectifier les surfaces cylindriques ou coniques, extérieures et intérieures;

b) La machine à rectifier les surfaces planes. Ces machines peuvent être munies de mandrins magnétiques pour l'usinage de la fonte et de l'acier.

Il existe également de petites meules à main à commande électrique, qui peuvent rendre de grands services et nous laissons de côté les machines à affûter.

Nous supposons ici que l'emploi de la machine à rectifier est réservé au travail de finition, mais ce n'est pas sa seule application, car, industriellement, les machines à meuler et à rectifier peuvent remplacer dans bien des cas le tour et même la fraiseuse.

De plus, le travail de la rectifieuse ne nécessite pas forcément une excellente préparation de la pièce au tour. Celle-ci peut souvent n'être que dégrossie.

L'emploi des machines à rectifier les surfaces cylindriques demande beaucoup de soin et beaucoup de surveillance.

Il est absolument indispensable, si l'on veut obtenir un travail bien fait, un poli correct de la pièce, d'en soigner le montage d'une part, et de choisir convenablement la nature et le grain de la meule et les vitesses de rotation de la meule et de la pièce, d'autre part.

Il faut s'assurer également que le tablier de la machine est bien parallèle au mouvement de translation de la table si l'on veut effectuer une rectification bien cylindrique; ce réglage doit être effectué avec beaucoup de précision.

Les points de centre de la pièce à rectifier doivent être particulièrement soignés. Si la pièce est quelque peu flexible, il est nécessaire de la maintenir entre les pointes à l'aide de butées spéciales.

Les déformations des arbres rectifiés, malgré l'arrosage, sont également à craindre et un recuit est parfois nécessaire.

Une cause de rayure de la pièce ou de broutage est souvent due à une vibration de la machine causée, non pas par les engrenages, mais par le mouvement de la meule dû à un défaut d'équilibrage ou à une courroie défectueuse.

Tous ces défauts disparaissent par l'emploi d'une machine lourde, exempte de jeu, utilisant une meule de bonne qualité bien équilibrée, tournant bien rond.

Mais la question capitale reste celle de la nature de la meule et de la grosseur du grain.

Les abrasifs constituant la meule peuvent être de l'émeri, du corindon, du carborundum (carbure de silicium), de l'alundon,

etc. Il est indispensable de bien observer les tableaux fournis par les fabricants de meules et de choisir celles-ci comme nature d'abrasif et grosseur de grain, suivant le travail à effectuer.

Par exemple, une meule en crystolon (carbure de silicium) de grosseur de grains de 24 à 36 et de dureté P à R, recommandée pour le travail du bronze, sera inutilisable pour la rectification d'une pièce intérieure en acier trempé qui nécessite l'emploi d'une meule en alundon de grosseur de grain 36 à 40, dureté J à K, etc.

De plus, il faut employer une vitesse de rotation de la meule et de la pièce et une avance en fonction de la nature du métal travaillé.

Un jet d'eau ou mieux d'eau alcaline, qui évite la rouille, doit de plus être convenablement dirigé entre la meule et la pièce travaillée.

Quant à la forme des meules, elle est extrêmement variable suivant le travail à exécuter. Leur affûtage s'effectue au diamant tenu mécaniquement, non à la main.

Quelques autres remarques bien souvent méconnues s'imposent :

Par exemple, une meule est un outil destiné à couper et non à user.

Une meule dure a plus tendance à faire varier la température de la pièce et à se glacer qu'une meule tendre.

La finesse du grain de la meule n'a rien à voir avec la finesse du grain de la surface désirée, du moins pour la rectification des pièces en fonte d'acier. Ce rapport entre la finesse des grains n'existe que pour le bronze et le laiton.

En général, plus la pièce est dure, plus le grain de la meule doit être gros, pour obtenir un beau poli.

Signalons enfin, que la rectification intérieure nécessite l'emploi de porte-meule généralement en porte-à-faux devant tourner à très grandes vitesses et sans vibrations.

Bien souvent, l'emploi d'un simple porte-meule entraîné électriquement et pouvant se monter sur un tour, rendra de grands services dans un atelier ne possédant pas de machine à rectifier.

Rodage.

Cette opération se rencontre fort souvent. Faite avec un peu de soin, elle ne présente pas de difficultés particulières.

Il s'agit généralement de roder des pièces planes ou coniques.

Quelle que soit la forme de la pièce, il est indispensable de posséder, non seulement un ou plusieurs rodoirs mais un calibre, un tampon, qui servira uniquement à la vérification du travail et jamais à roder - le tampon peut donc être plan, ou cône, mâle ou femelle.

Le rodage plan nécessite l'emploi d'un marbre très plan.

Or, lorsqu'on rode deux surfaces sensiblement planes l'une sur l'autre, on obtient généralement une surface sphérique dont le plan n'est qu'une limite difficile à obtenir.

Pour roder un plan idéal, il faut posséder trois surfaces pseudo planes A.B.C. On rode A sur B, puis sur C. On corrige B et C par rodage l'un sur l'autre, puis A par rodage sur l'un des autres plans jusqu'à ce que les trois surfaces s'appliquent exactement l'une sur l'autre.

Les abrasifs couramment employés pour les opérations de rodage, sont le carborundum (carbure de silicium employé en grains N° 100 environ pour le dégrossissage), l'émeri (alumine mélangé à de l'oxyde de fer) et la ponce (silicate d'alumine et de potasse) utilisée pour la finition.

La précaution fondamentale à prendre dans le travail de rodage, consiste à mettre le minimum d'abrasif et à le répartir uniformément, sans surépaisseur, sur la surface à roder.

De plus, la pression exercée doit être légère et régulièrement répartie. Pour obtenir le résultat cherché, il est donc bon de déplacer continuellement la position du rodoir par rapport à la pièce en rodage, que celle-ci soit fixe ou tenue à la main comme le rodoir, ou montée sur un tour.

Pour vérifier la qualité du rodage, essuyer la pièce avec beaucoup de soin avant de présenter le tampon. S'assurer que celui-ci ne boite pas et vérifier qu'il n'existe pas de trou dans le rodage (endroit non touché) en étendant sur la pièce une très légère couche de rouge d'Angleterre (ou colcothar : oxyde ferrique Fe O) légèrement huilé. Tourner le tampon sur la pièce et vérifier que la surface de frottement est uniformément touchée.

Soudure et brasure.

La réunion de pièces par soudure ou brasure est une opération courante, qui tend à prendre une importance accrue depuis l'apparition de la soudure autogène étendue des métaux ferreux aux alliages légers.

On distingue donc deux types différents de soudure : la soudure ordinaire et la soudure autogène.

Les soudures ordinaires se subdivisent en soudures faibles et en brasures.

La soudure faible est constituée par un alliage d'étain et de plomb, dont la composition varie suivant la nature des métaux à souder.

Par exemple, un alliage contenant 60 % d'étain pour 40 % de plomb convient pour le laiton ou le cuivre et un alliage à 30 % d'étain pour 70 % de plomb est employé pour la soudure du plomb.

La soudure des alliages de cuivre s'effectue sans difficulté après nettoyage et décapage des pièces au chlorure de zinc.

Le suif est utilisé pour la soudure de plomb.

L'alliage étain-plomb est fondu au moyen d'un fer à souder, panne de cuivre rouge chauffée au rouge sombre, au charbon, au

gaz ou électriquement, convenablement nettoyée sur une pierre de chlorure d'ammonium.

Il suffit de passer le fer à souder sur les bords décapés des deux pièces à souder maintenues serrées l'une contre l'autre en faisant couler l'alliage progressivement avec le fer bien étamé.

Les pièces soudées doivent être débarassées de toute trace de chlorure de zinc par lavage à l'eau bouillante.

On a souvent intérêt, dans le cas de soudure de pièces devant tenir le vide, à laisser un bon congé de soudure entre les pièces soudées.

On doit abandonner tout décapant au chlorure de zinc pour effectuer les soudures de fils fins de cuivre. L'oxydation des fils ou de pièces fines à souder est évitée en employant comme décapant de la résine ou colophane en poudre mélangée à l'alcool dénaturé; mais il est nécessaire dans ce cas d'employer un fer à souder très chaud. On utilise d'ailleurs couramment de la soudure en fils ou petits tubes à âme décapante.

Le fer à souder peut souvent être remplacé par un crayon de charbon réuni à une borne secondaire d'un transformateur fournissant environ 2 volts sous forte intensité, l'autre borne étant réunie à la pièce à souder. Cet appareillage convient bien à l'emploi de la soudure en fils, il s'apparente d'ailleurs à la soudure par résistance.

Brasure.

Constituée par des alliages de compositions variables suivant la nature des métaux à souder, leur température de fusion est beaucoup plus élevée que celles des soudures faibles, ce point de fusion étant toujours légèrement inférieur à celui des pièces à souder avec lesquelles cette brasure forme un alliage très résistant.

On soudera, par exemple, du platine avec de l'or.

L'or avec un alliage contenant 50 % or, 25 % cuivre, 25 % argent.

L'argent avec un alliage contenant 67 % argent, 23 % cuivre, 10 % zinc.

Le fer peut se souder avec du laiton.

La brasure type employée en chaudronnerie contient environ 50 % cuivre et 50 % zinc ou 50 % cuivre, 35 % zinc et 15 % étain.

Le décapant employé est le borax, les pièces soudées maintenues rapprochées doivent être fortement chauffées, soit au chalumeau, soit à la forge. Un dard de chalumeau vient fondre la brasure pendant que du borax est continuellement apporté au point où se produit la soudure.

La brasure à l'argent ou à la "soudure" jaune s'effectue particulièrement bien avec un chalumeau oxygène-gaz d'éclairage.

Comme ci-dessus, les pièces brasées doivent être ensuite lavées dans un bac contenant de l'eau bouillante.

Lorsque plusieurs pièces sont à souder les unes sur les autres, sans qu'on puisse les fixer par des vis, il est pratique d'effectuer d'abord une brasure pour souder les pièces principales et de souder simplement les pièces auxiliaires.

Soudure autogène.

Cette soudure est couramment employée pour réunir des plaques de plomb et surtout des pièces de fer. La source de chaleur est le dard fin d'un chalumeau oxyacétylénique, le métal d'apport étant de même nature que les métaux à souder. Le réglage du chalumeau et la vitesse de soudure constituent des tours de main que l'on peut apprendre très rapidement.

Soudure à l'arc.

Les postes de soudure à l'arc sont en fait de deux types :

a) Postes à courant continu, généralement équipés de dynamos anticompound, fournissant un courant réglable de 30 à 200 amp., la tension aux bornes de l'arc étant de l'ordre de 30 v., mais variant avec la longueur de celui-ci. L'emploi du courant continu ne nécessite pas l'usage d'électrodes recouvertes de décapant;

b) Postes à courant alternatif monophasé, constitués par un simple transformateur à fuites, fournissant à vide une tension de 60 v. efficaces environ. L'arc à courant alternatif est moins stable que celui à courant continu et demande l'emploi d'électrodes enrobées de décapant, qui joue en même temps le rôle de stabilisateur pour l'arc.

L'emploi de l'arc est extrêmement intéressant lorsque l'on veut souder des métaux qui ne prennent pas la soudure, tels que : tungstène, molybdène, aciers spéciaux (inoxydables), fils résistants, etc.

Soudure de l'aluminium et des alliages légers.

Comme pour les métaux envisagés ci-dessus, on peut distinguer la soudure tendre et la soudure autogène. Quel que soit le genre de soudure effectué, les surfaces à souder doivent être décapées très soigneusement : lavage à la benzine, puis à la lessive alcaline, suivi d'une neutralisation par l'acide azotique à 10 %, rinçage à l'eau.

La soudure tendre comporte l'emploi d'alliages à bas points de fusion (zinc 50 %, étain 46 %, cuivre 3 %, plomb 1 %). Dans ce genre de soudure, l'extrémité des éléments à souder n'est pas amenée à l'état de fusion, seul le métal d'apport est fondu.

La soudure tendre, à bas point de fusion, est généralement réservée aux pièces de fonderie ou aux petites pièces, mais la résistance à la corrosion et la résistance mécanique restent faibles. Pour effectuer cette soudure, il est nécessaire de chauffer, au préalable, les pièces vers 300° et d' "étamer" les parties à souder avec une brosse métallique. On dépose ensuite la couche de métal.

La soudure dure, à haut point de fusion, est, au contraire, constituée par un alliage à haute teneur en aluminium (de 70 à

95 %). Il peut contenir différents métaux, tels que cuivre, zinc, etc. On peut également utiliser l'alliage d'aluminium à 10 % de silicium.

Il faut décaper et réchauffer les pièces avant d'effectuer la soudure dont le point de fusion de l'alliage est compris entre 450° et 600°. La source de chaleur doit être la lampe à souder ou le chalumeau. De plus, il est nécessaire, pour faire fondre la couche d'alumine qui gêne toujours la soudure des alliages légers, d'employer un flux décapant à point de fusion pas trop élevé.

Comme composition de ces flux décapants, que l'on trouve d'ailleurs dans le commerce, on peut citer la suivante :

Chlorure de potassium 45 % - Chlorure de sodium 30 % - Chlorure de Lithium 15 % - Fluorure de potassium 7 % et bisulfate de sodium 3 %.

La soudure autogène est de loin le procédé le plus employé. Elle nécessite l'emploi du chalumeau oxyacétylènique ou du chalumeau oxhydrique; comme baguette d'apport, on utilise généralement soit un alliage de composition analogue à celle du métal à souder soit, pour l'aluminium pur, un alliage d'aluminium contenant 5 à 10 % de silicium. On utilise de plus un flux décapant analogue à celui dont la composition vient d'être donnée. Comme toujours, les pièces doivent être soigneusement décapées, puis lavées après soudure. Les plaques soudées bord à bord, doivent être biseautées, parfaitement maintenues en contact. Toute la difficulté réside dans la vitesse de soudure qui est relativement grande et qui demande un peu d'apprentissage, ainsi que dans la déformation due aux variations de dilatation.

Il est d'ailleurs recommandé de chauffer les pièces (pièces moulées notamment) avant et pendant la soudure et de les laisser refroidir lentement.

Signalons qu'industriellement on soude les tôles épaisses à l'arc électrique qui concentre la chaleur dans une zône très étroite évitant ainsi les déformations, - mais cette soudure nécessite un appareillage spécial, la dynamo devant fournir un courant d'environ 30 ampères sous 60 V.

Enfin, la soudure électrique par résistance, très employée dans l'industrie (aéronautique notamment) qu'elle soit faite par points comme c'est généralement le cas, à la molette ou par rapprochement, nécessite également un appareillage spécial : on a donc intérêt dans la majorité des cas à faire exécuter ces opérations par un spécialiste.

BIBLIOGRAPHIE

Construction mécanique des instruments scientifiques :

Professeur POLLARD : Revue d'Optique, n° 1, 5 et 8 de 1923.

De la construction des Instruments et de la Géométrie du Corps solide :

DUNOYER : Les appareils de Mesure et de Contrôle, vol. 2, édité par la Sté d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, 1943.

Lunettes et télescopes :

A. DANJON et A. COUDER, édité par la Revue d'Optique.

Travaux et Mémoires de la Sté Française des Mécaniciens :

Mécanique et précision et métrologie, 1939.

Construction, description et emploi des appareils de mesure et observation :

BOUASSE (Delagrave, éditeur).

DEUXIÈME CHAPITRE

LES PRINCIPALES OPÉRATIONS DE SOUFFLAGE DE VERRE AU LABORATOIRE

par

Ch. AMATE

Maître souffleur de verre

LES PRINCIPALES OPÉRATIONS DE SOUFFLAGE DU VERRE AU LABORATOIRE

Outillage 69
Coupe du verre 70
Les différentes sortes de verre 71
Fabrication d'une ampoule 73
Fabrication d'un tube à essais 74
Soudure de deux tubes de diamètres différents 75
La soudure latérale 75
Courbures et serpentins 77
Evasement d'un tube 78
Soudures internes 78
Soudures verre-métal 80
Fabrication d'un voyant à décharge 81
Soudure sur place 82
Réparation des fêlures 83
Travail de la silice 84
Ajustage d'un rodage 85

DEUXIÈME CHAPITRE

LES PRINCIPALES OPÉRATIONS DE SOUFFLAGE DE VERRE AU LABORATOIRE

OUTILLAGE

L'outillage nécessaire au soufflage de verre se compose essentiellement du chalumeau, avec sa soufflerie si l'on ne dispose pas de distribution d'air comprimé, et un détendeur à oxygène, puis d'un couteau à verre, de pinces diverses, charbons plats et ronds, cônes, tringles et triangles métalliques, en laiton ou mieux en nickel, plus résistant pour le travail des verres durs.

Le chalumeau doit être sur socle ou articulé. Le modèle courant comporte un tube central, dans lequel on introduit des buses de différents diamètres permettant d'avoir une flamme plus ou moins large, suivant l'importance du travail à effectuer. Les buses utilisées le plus fréquemment ont un diamètre de 1 à 2 millimètres, celles de plus grand diamètre servant à recuire les soudures faites sur de gros tubes ou des ballons ayant dû subir des modifications, ou encore à faire des petits ballons. Il existe des buses très étroites (quelques 1/10 mm.) pour réaliser des "microflammes" servant à faire de petites soudures (thermocouples, petites pièces de verre, etc.). La buse servant à l'arrivée de l'air, ou du mélange air-oxygène, il est naturellement nécessaire de régler l'arrivée du gaz suivant la grosseur de la buse utilisée.

Pour le travail du verre blanc et du cristal, on utilise de l'air, mais les verres plus durs, comme le Pyrex, nécessitent l'emploi de l'oxygène. Dans ce cas, il est bon de se protéger les yeux contre le rayonnement avec des lunettes de verre fumé clair. Il est avantageux de munir la tuyauterie amenant l'oxygène d'un raccord en T relié à l'air (fig. 1). Ceci permet de passer facilement de l'oxygène à l'air pour recuire les pièces en fin de travail. La canalisation d'air ou la soufflerie doit être munie d'un robinet d'accès facile et aussi proche que possible du chalumeau, car on a souvent besoin, au cours du travail, de modifier l'allure de la flamme. On a toujours intérêt à se servir d'un chalumeau assez gros, de manière à disposer d'une large flamme, en particulier pour

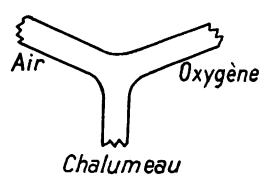


Fig. 1.- Raccord en T.

pouvoir effectuer des opérations de recuit sur des pièces un peu importantes.

Pour le travail de la silice, on utilise un chalumeau à gaz et oxygène pur, du genre de ceux qui servent à la soudure autogène des métaux.

Sur la figure 2 sont rassemblés les principaux outils du souffleur de verre.

Les pointes à évaser sont généralement constituées par des tringles en laiton de 7 à 8 millimètres de diamètre, terminées en

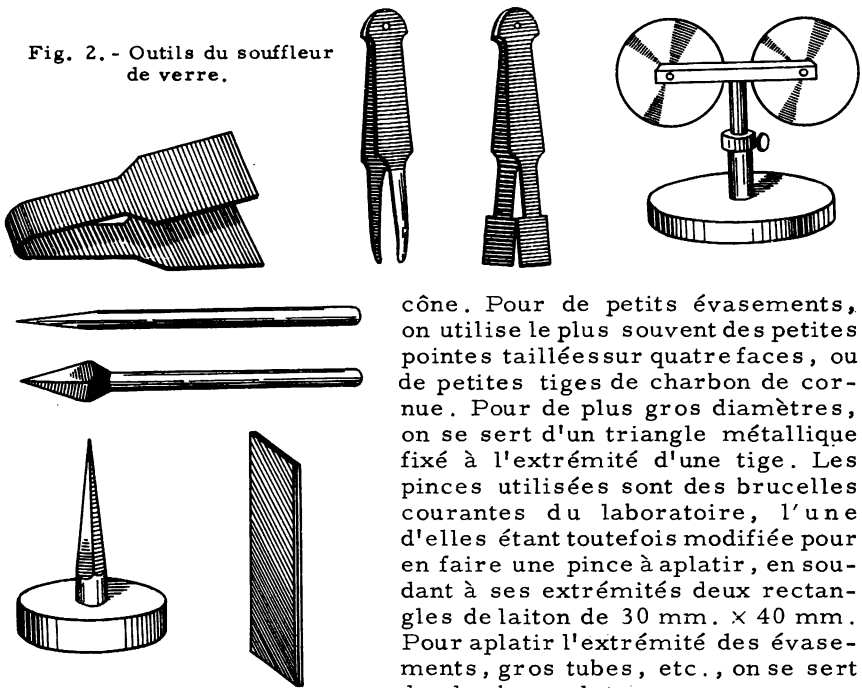


Fig. 2. - Outils du souffleur de verre.

cône. Pour de petits évasements, on utilise le plus souvent des petites pointes taillées sur quatre faces, ou de petites tiges de charbon de cornue. Pour de plus gros diamètres, on se sert d'un triangle métallique fixé à l'extrémité d'une tige. Les pinces utilisées sont des brucelles courantes du laboratoire, l'une d'elles étant toutefois modifiée pour en faire une pince à aplatir, en soudant à ses extrémités deux rectangles de laiton de 30 mm. × 40 mm. Pour aplatir l'extrémité des évasements, gros tubes, etc., on se sert de charbons plats.

Le couteau à verre est une lame d'acier trempé très sec, dont les bords sont affûtés en biseau. Le biseau ne doit pas être tranchant, mais présenter des petites aspérités que l'on obtient en heurtant le bord du couteau sur un morceau de grès ou sur le champ d'une meule émeri. A défaut d'un couteau à verre, un tiers-point convient également, ou une petite scie à couper les ampoules pharmaceutiques.

Le support destiné à soutenir les longues cannes au cours du travail au chalumeau comporte deux disques montés sur une barrette mobile dont l'axe est porté sur une tige creuse fixée sur un socle, autour de laquelle il doit tourner librement.

COUPE DU VERRE

Pour couper un tube d'un diamètre de 3 à 15 millimètres, il suffit de tracer un trait à l'aide d'un couteau à verre à l'endroit que

l'on désire sectionner - le trait n'a pas besoin de faire le tour du tube - et ensuite de tirer le tube des deux mains en imprimant une légère torsion. Le trait doit être très fin; il faut éviter, spécialement lorsqu'on se sert d'une lime, de creuser un large sillon dans le verre.

Pour les diamètres supérieurs, on fait un trait comme précédemment et on y applique une pointe du même verre dont l'extrémité est chauffée au rouge; une fêlure s'amorce à l'endroit du trait et l'on continue l'opération en s'éloignant chaque fois de quelques millimètres de la fêlure dans son prolongement. Ce procédé convient également au Pyrex, la pointe de verre doit seulement être chauffée davantage, au rouge blanc.

L'utilisation d'un fil résistant en nichrome chauffé électriquement, entourant le tube à l'endroit marqué par le couteau à verre, assure également une coupe parfaite. On chauffe le fil au rouge sombre dans le cas du verre blanc et du cristal et au rouge blanc dans le cas du Pyrex.

On peut encore utiliser un diamant monté sur une tige, avec lequel on pratique une rayure à l'intérieur du tube, celui-ci étant pour cette opération placé sur deux supports en V pour le faire tourner. Une fois la rayure obtenue, on chauffe le tube extérieurement. Pour les gros tubes épais de Pyrex, on peut être amené à chauffer le tube, puis à le refroidir brusquement avec un petit jet d'air frais.

Un dernier procédé consiste à se servir d'une microflamme ou d'une petite flamme de chalumeau : le plus sûr est de coller de part et d'autre du trait deux bandes de papier mouillé distantes de 2 millimètres environ du trait et de chauffer à la microflamme toute la partie laissée libre; la coupure se produit généralement au cours du chauffage ou au début du refroidissement. Pour des tubes de diamètre supérieur à 30 mm. ou des épaisseurs supérieures à 3 mm., l'écartement des bandes de papier sera augmenté jusqu'à 4 mm. pour les tubes de 80 mm.

LES DIFFÉRENTES SORTES DE VERRE

Il existe, pour le laboratoire, toute une gamme de verres de propriétés physiques différentes. On les choisit le plus souvent suivant leur coefficient de dilatation, qui doit être en rapport avec leur utilisation, spécialement pour les soudures verre-métal. Dans d'autres cas, on s'attache à une autre propriété, par exemple perméabilité aux rayons X ou ultra-violets.

Dans les verres très dilatables se rangent le verre blanc, qui se soude avec certains ferro-nickels, et le cristal, très peu perméable aux rayons X, mais qui se soude parfaitement aux métaux suivants : platine, Copper Clad, Dumet, platinite. Ces verres se travaillent avec un mélange air et gaz, sans qu'il soit utile d'employer l'oxygène; le cristal noircissant facilement par réduction chimique au cours du travail, il est indispensable de le chauffer dans le haut de la flamme.

On utilise généralement des verres moins dilatables, tels que le Pyrex, bien que ce dernier ne se soude pas très bien aux métaux

et que des traversées de courant supérieures à 1 millimètre de diamètre risquent de présenter des fuites. Pour des dimensions supérieures, il faut utiliser le B 40 ou le 702 P qui se soudent bien au tungstène. Ces verres se soudent également sur le Pyrex.

Dans l'industrie électro-technique, on utilise des verres tels que le verre Moly, qui se soudent au molybdène et aux alliages fer-nickel, même dans des dimensions très importantes ; tous ces verres se travaillent avec un mélange de gaz, air, oxygène et le Pyrex sans mélange d'air. Il faut signaler que le verre Moly se décompose assez facilement sous l'action de la chaleur et de l'humidité et encore plus avec les acides.

Il est indispensable avant de faire une soudure de deux verres d'origine différente et parfois aussi du même fabricant, de comparer leurs coefficients de dilatation. L'auteur emploie dans ce but la méthode suivante :

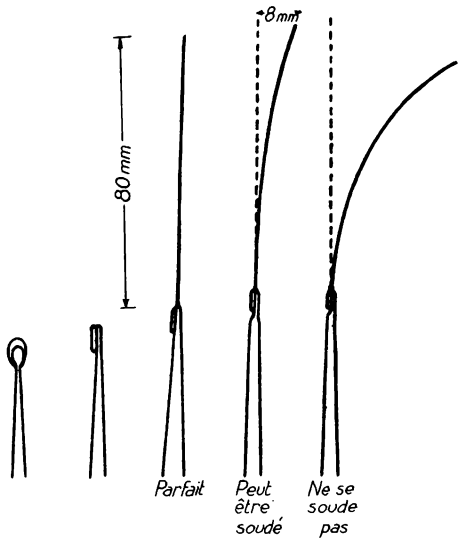


Fig. 3. - Essai de deux verres devant être soudés.

On aplatit une goutte du premier verre formée à l'extrémité d'une pointe et on vient y appliquer une goutte du second verre, que l'on aplatit aussi. Les deux pastilles sont étirées ensemble, sans aucune torsion, pour faire une pointe de 80 millimètres. Au refroidissement, on obtient une courbure d'autant plus grande que les coefficients de dilatation sont plus différents. Une flèche supérieure à 8 millimètres traduit l'impossibilité de souder ; jusqu'à 8 millimètres, les deux verres peuvent entrer dans une soudure simple et, pour une soudure interne, il faut que la pointe reste parfaitement droite.

SOUFFLAGE DU VERRE

La table du souffleur de verre doit être en bois nu. L'amiante est à prohiber, car ses fibres se collent au verre chaud quand on y dépose des pièces, puis laissent dans les soudures de petits trous très difficiles à déceler. Il ne faut jamais poser sur une surface froide une pièce de verre venant d'être travaillée : le meilleur support est une barrette de bois.

Au début de toute opération, il est indispensable de chauffer le verre progressivement pour éviter des fêlures; pour le cristal, on chauffe d'abord en flamme éclairante, puis dans la flamme air-gaz; pour le Pyrex, on utilise le mélange air-gaz, puis, lorsque le verre commence à rougir, le mélange gaz-oxygène.

FABRICATION D'UNE AMPOULE (Fig. 4) .

La première opération, dans le soufflage du verre, consiste à étirer une ampoule entre deux pointes; il est nécessaire de donner au tube un mouvement de rotation régulier, obtenu en le roulant entre le pouce et l'index de la main gauche, tandis que les autres doigts lui servent de support; on chauffe l'extrémité du tube et, lorsque celle-ci est suffisamment malléable, on la saisit avec une pince brucelle et étire la pointe hors de la flamme du chalumeau (fig. 5 a et b). On maintient la position des mains jusqu'au moment où le verre est redevenu rigide. Ce premier travail effectué, on étire une seconde pointe; pour que celle-ci soit bien centrée, on maintient le verre en fusion à l'aide de la première pointe tenue dans la main droite, qui lui imprime le même mouvement de

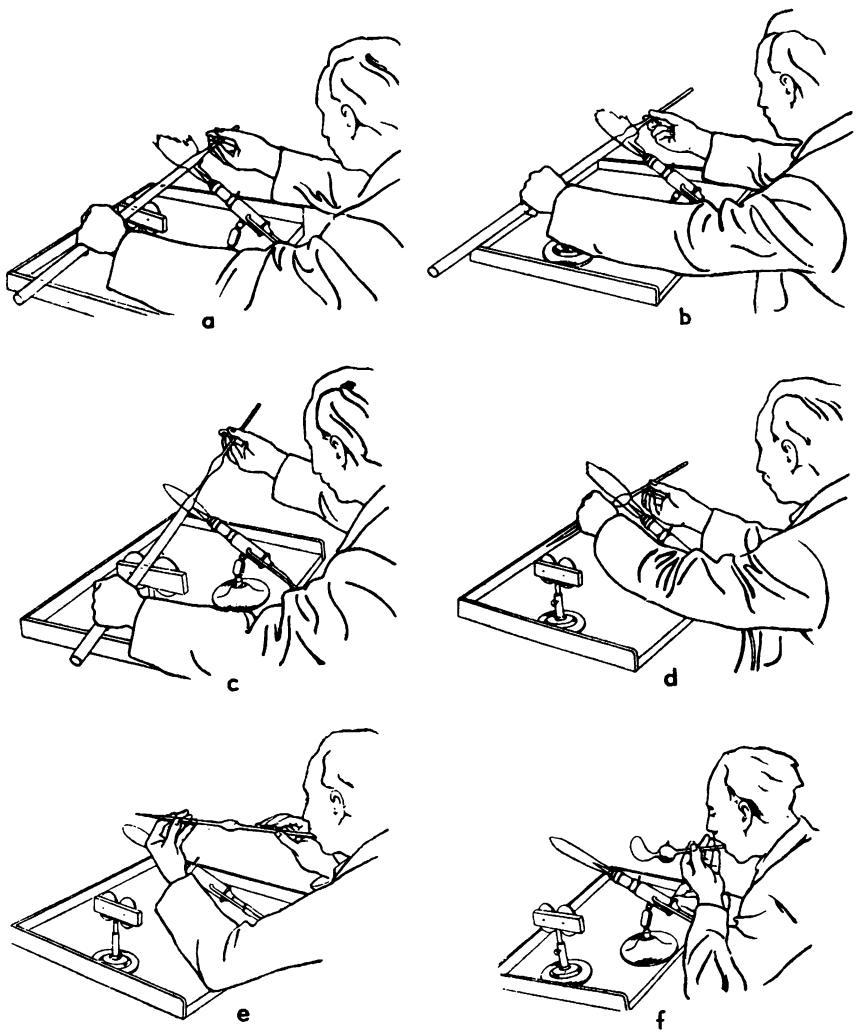


Fig. 4. - Fabrication d'une ampoule.

rotation que celui donné par la main gauche, ce mouvement étant poursuivi au moment de l'étirage, et durant toute l'opération.

Les pointes laissant entre elles une partie cylindrique d'environ 3 centimètres de longueur (pour du tube de 16 à 20 mm. de diamètre), on commence par ouvrir l'extrémité d'une des pointes, puis on épaissit les parties côniques près du cylindre en les chauffant et refoulant le verre. La pointe ouverte étant tenue entre les deux doigts de la main droite, on chauffe le centre du cylindre, souffle légèrement pour régulariser les épaisseurs, et refoule de la main droite en fondant tout le cylindre.

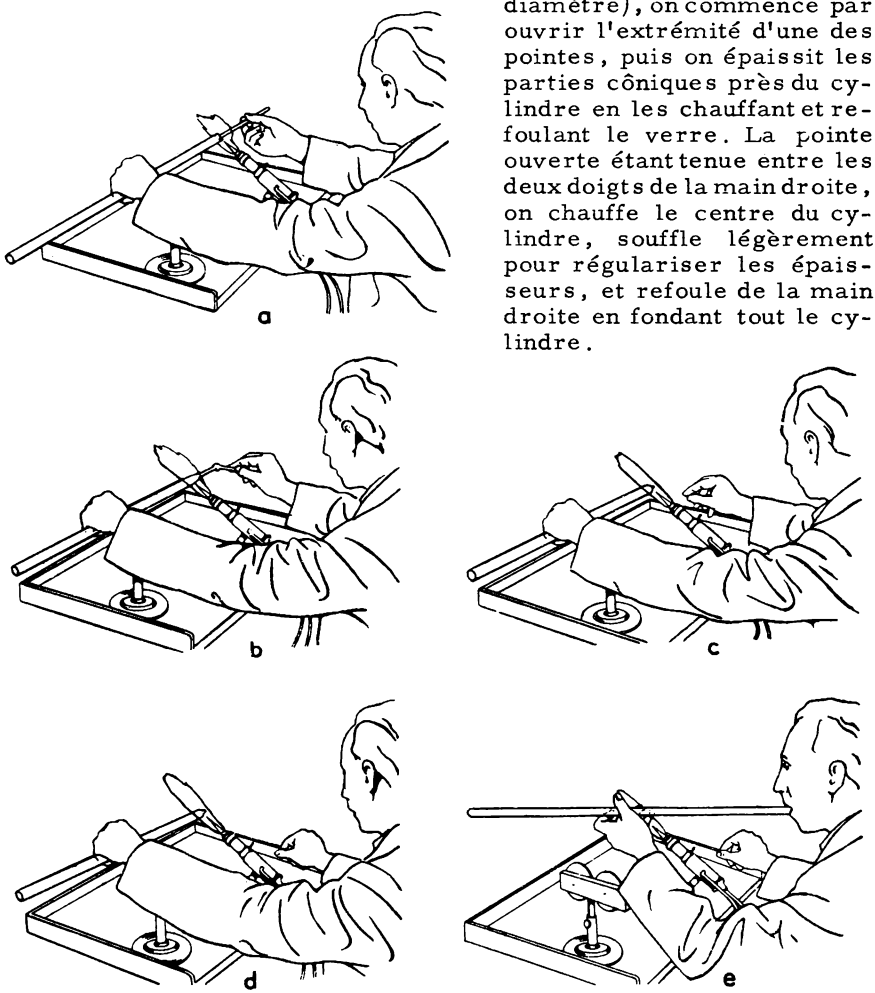


Fig. 5.- Fabrication d'un tube à essais.

Lorsque l'ensemble forme une masse de verre uniformément molle, on souffle lentement hors de la flamme en continuant de tourner régulièrement (fig. 4-e). On ouvre ensuite l'ampoule par soufflage si l'on doit la souder à l'extrémité d'un tube (fig. 4-f).

FABRICATION D'UN TUBE A ESSAIS (Fig. 5)

On coupe un tube suivant les indications données plus haut et on refond légèrement les bords. On étire une pointe à l'autre extré-

mité; on chauffe ensuite la naissance de la pointe avec une flamme; on étire dans la flamme et il se forme une goutte de verre que l'on continue de chauffer sans la sortir de la flamme, puis on la souffle et réchauffe pour régulariser l'épaisseur en obtenant un fond arrondi. Pour obtenir un fond plat, les opérations sont les mêmes, mais, en dernier lieu, on chauffe le fond et on aplatit à l'aide d'un charbon plat appuyé légèrement, normalement à l'axe du tube.

Fabrication d'un ballon : On épaissit le tube en soufflant progressivement et ramassant le verre comme pour la fabrication d'une boule. Lorsque la quantité de verre est suffisante, on souffle en tournant lentement d'une façon continue. Pour supprimer la pointe, on chauffe le plus près possible du fond du ballon avec une petite flamme et tire la pointe en maintenant dans la flamme; la goutte de verre est ensuite soufflée et on régularise l'épaisseur et la forme du fond du ballon par refusion et soufflage avec une flamme assez large. Il est aussi possible d'enlever la pointe avant le soufflage du ballon.

SOUDURE DE DEUX TUBES DE DIAMÈTRES DIFFÉRENTS (Fig. 6)

Il faut étirer le plus gros tube pour qu'il soit, à l'endroit de la soudure, de même diamètre que le petit; l'étirage étant fait de la manière habituelle, on sépare la pointe du cylindre au feu, comme dans la fabrication d'un tube à fond rond, mais, au lieu de faire disparaitre la goutte de verre, on chauffe cette dernière et souffle progressivement, mais assez fortement pour provoquer une soufflure de verre mince, que l'on détache facilement au couteau à verre. Ensuite, on chauffe les deux pièces, le gros tube tenu par la main gauche et le petit par la main droite, jusqu'à ramollissement. Ne jamais oublier, en faisant une soudure, de ne rapprocher les deux pièces que lorsque leurs extrémités sont franchement en fusion. On les colle en refoulant légèrement d'abord et en étirant légèrement ensuite, puis on fond en chauffant davantage le gros tube et on souffle. Pour obtenir une forme conique, on tire en même temps. S'il y a lieu, on refond et ressoufle la soudure jusqu'à ce que les deux verres soient bien mélangés et ne présentent que peu de traces et aucun bourrelet. Il est évident qu'au long de toutes ces opérations, le mouvement tournant du verre ne doit pas cesser tant que celui-ci est en fusion.

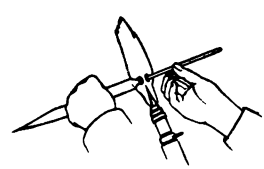


Fig. 6.- Soudure de deux tubes en bout

LA SOUDURE LATÉRALE (Fig. 7).

L'endroit où doit être faite la soudure est chauffé avec une petite flamme; on vient y appliquer une pointe de verre chaude pour étirer une petite pointe. On l'enlève, chauffe la perle de verre qui

se trouve formée et, en soufflant vigoureusement, on obtient une soufflure très mince. Avec un peu d'expérience, on peut supprimer la première partie et se contenter de chauffer avec une petite flamme l'endroit à ouvrir, puis de souffler.

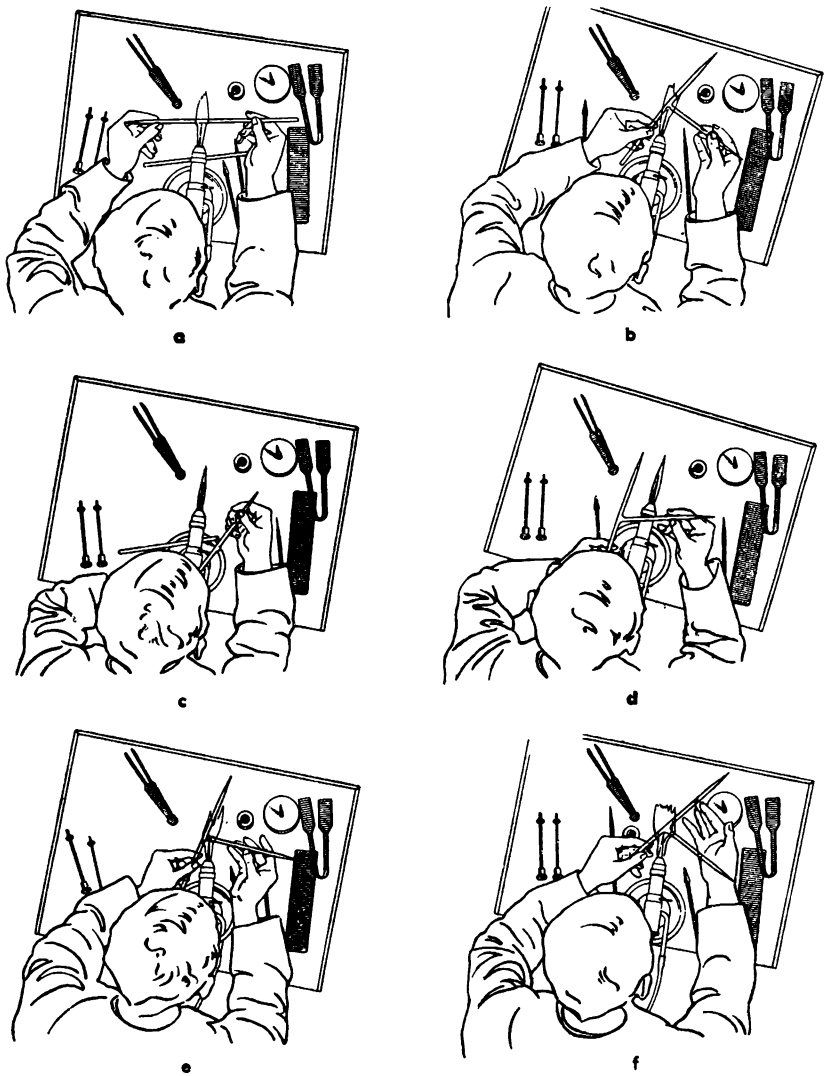


Fig. 7. - Exécution d'une soudure latérale.

La soufflure est enlevée au couteau à verre, l'ouverture ainsi pratiquée devant être de même diamètre que le tube à souder. Si ce n'est pas le cas, on évase soit l'ouverture, soit le tube, pour réaliser cette égalité. On fond les deux bords, colle et étire légèrement ; un rapide examen fixe immédiatement sur l'endroit le plus défectueux (trou, épais bourrelet) qu'on refond en premier

lieu en soufflant pour répartir l'épaisseur du verre. On poursuit l'opération en faisant le tour de la soudure. Une fois terminée, celle-ci ne doit pas présenter de masse de verre mal fondue. Sa base doit être légèrement conique (fig. 8). On termine en chauffant en flamme douce toutes les parties avoisinant la soudure, pour supprimer les tensions toujours produites par un chauffage local.

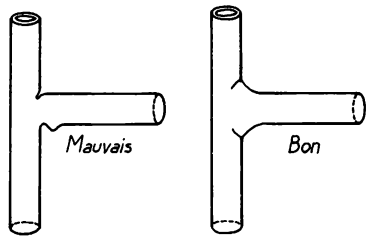


Fig. 8. - Soudure latérale.

COURBURES ET SERPENTINS (Fig. 9)

Pour courber un tube, on le chauffe progressivement sur une assez grande longueur en lui imprimant d'abord un mouvement de rotation qu'on interrompt ensuite (fig. 9). On ne peut obtenir une courbure régulièrement arrondie sans utiliser une flamme large chauffant une bonne longueur du tube et les trois-quarts de sa section.

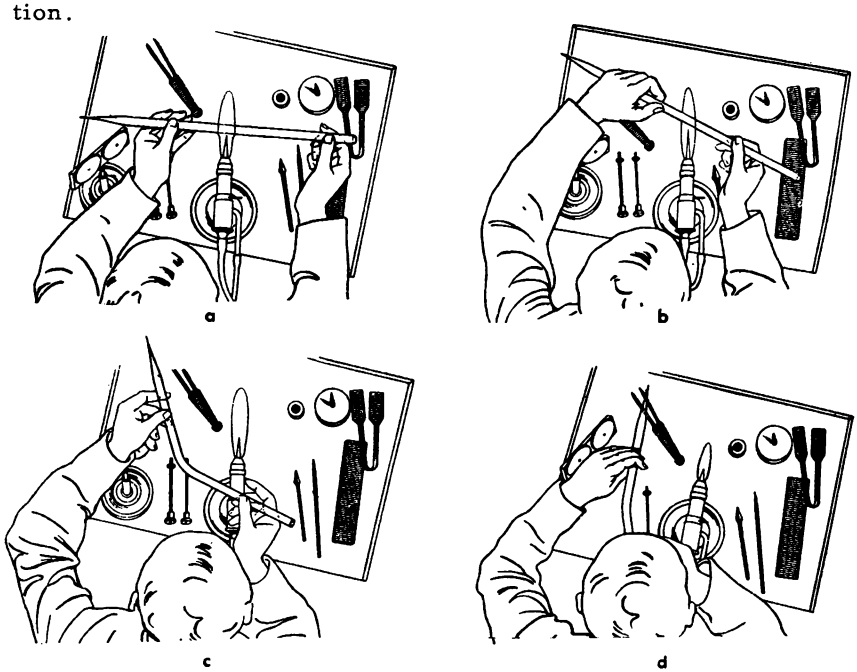


Fig. 9. - Courbure d'un tube.

Dès que le tube sera malléable, on le courbera en élevant les deux extrémités, la partie la plus chaude étant vers le bas et la plus froide à l'intérieur de la courbe; il faut, en effectuant la courbure, souffler suffisamment pour que la section ne soit pas aplatie, mais pas trop fort pour ne pas faire de boursoufflure (fig. 10).

La confection d'un serpentin ou d'une spirale se fait de la même manière que la courbure, sauf la position des mains qui est différente fig. 11).

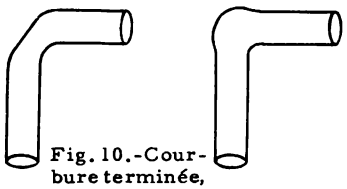


Fig. 10.-Courbure terminée, mal faite.

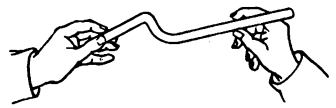


Fig. 11.- Position des mains pour le serpentin.

Le serpentin peut également se faire sur un mandrin en métal, de préférence un tube de laiton, tenu par l'intermédiaire d'une pièce de bois, et dont une extrémité sera garnie d'amiante; une première courbure est faite (fig. 12), ensuite, après fixation du tube sur le mandrin, on chauffe le verre jusqu'à ramollissement; on cintre le tube de verre sur le mandrin en soufflant; pour du verre genre Pyrex, il n'est pas utile de garnir le mandrin de papier d'amiante à l'endroit où sera fait le serpentin, mais il est indispensable de le faire pour le verre blanc ou le cristal, qui se briseraient au contact du métal moins chaud.

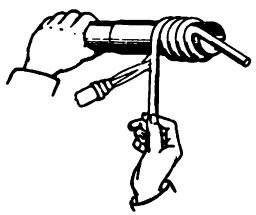


Fig. 12.-Fabrication d'un serpentin.

ÉVASEMENT D'UN TUBE

L'évasement d'un tube consiste à le terminer par une partie plus ou moins cônique et un bourrelet circulaire. C'est une opération qu'il y a lieu de faire dans les soudures internes et très souvent pour les soudures latérales ou en bout, lorsque les diamètres des tubes à souder sont différents. Elle est également utile pour la préparation de cônes devant être rodés et aussi pour renforcer l'extrémité de tubes devant recevoir un bouchon de liège.

Pour évaser un tube, on chauffe son extrémité sur une longueur égale à celle de la partie qu'on veut rendre conique, puis on l'élargit en y introduisant la pointe pour les petits diamètres et le triangle pour les grands, tout en faisant tourner le tube de verre autour de son axe, afin que la pièce offre une parfaite symétrie de révolution. Pour faire un bourrelet, on s'y prend de la même façon, mais en chauffant le tube seulement à son extrémité. Dans les deux cas, on régularise le bord avec le charbon à aplatir, qu'on applique normalement à l'axe du tube pendant que l'on continue à tourner celui-ci.

SOUDURES INTERNES

Plusieurs méthodes sont utilisées suivant la forme et les dimensions de la pièce à exécuter.

La manière la plus simple consiste à évaser le tube intérieur, puis à étirer le tube extérieur pour obtenir un cône dont le diamètre

moyen est celui du rebord du tube intérieur, et présentant une épaisseur suffisante. On chauffe cette partie conique, puis on bascule la pièce pour amener le tube intérieur à sa position définitive. On réchauffe la pièce remise horizontalement et souffle légèrement, puis on refond à plusieurs reprises pour bien dégager la soudure. Celle-ci une fois terminée doit être bien nette et ne pas présenter d'amas de verre ni d'épaisseurs inégales (fig. 13).

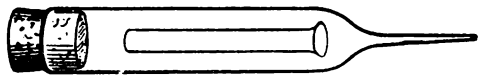


Fig. 13. - Préparation d'une soudure interne (évasement).

Quant il n'est pas possible de mettre en place avant la soudure le tube intérieur, on pratique sur celui-ci un bourrelet circulaire obtenu en soufflant et refoulant le verre à la manière d'une boule. Le tube extérieur est étiré pour lui faire un fond, que l'on ouvre au diamètre du bourrelet. Les deux pièces sont ensuite mises en contact et soudées par fusion. On dégage ensuite la soudure en réchauffant et en soufflant (fig. 14).

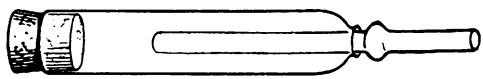


Fig. 14. - Préparation d'une soudure interne (bourrelet).

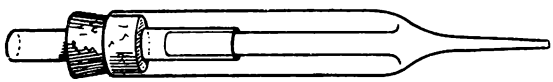


Fig. 15. - Préparation d'une soudure interne sur gros tube.

Pour les grands diamètres, à partir de 15 millimètres, par exemple pour la construction d'un piège à air liquide, il est préférable de maintenir le tube intérieur par un bouchon (fig. 15) de telle sorte qu'il puisse glisser librement; on étire le tube extérieur à quelques millimètres de l'évasement du tube intérieur, on fait ensuite glisser ce dernier sur la partie étirée et on fond comme pour les soudures précédentes.

Pour les soudures internes sur le côté d'un tube (fig. 16) les pièces doivent être maintenues plus rigidement que dans les soudures précédentes; le tube support est percé d'un petit trou latéral et une petite bande de papier sert de cale au tube intérieur.

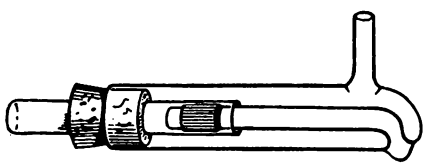


Fig. 16. - Préparation d'une soudure interne de coté.

Les soudures internes exigent un recuit particulièrement soigné, que l'on obtient en laissant la pièce dans la flamme du chalumeau, dont on réduira progressivement l'admission d'air pour finir par une flamme éclairante, l'opération devant durer au total 10 à 15 minutes.

SOUDURES VERRE-MÉTAL

En principe, il est généralement inutile d'essayer de souder un métal et un verre ne s'accordant pas parfaitement au point de vue du coefficient de dilatation. Si ces coefficients sont différents, il est nécessaire d'utiliser des verres intermédiaires dont les coefficients s'échelonnent entre les deux extrêmes.

On peut néanmoins souder directement céramique et Pyrex, les deux tubes étant placés bout à bout et la soudure étant faite sans bourrelet.

Soudure verre-platine : Le platine se soude parfaitement au cristal et aussi, quoique moins bien, au verre blanc. L'opération se conduit de la façon suivante : on chauffe le fil au rouge blanc et l'enrobe, à l'endroit où devra être effectuée la soudure, avec une fine baguette étirée de cristal (fig. 17). On fait trois ou quatre tours autour du fil et fond le tout pour avoir un petit cylindre entourant le fil sur une longueur de quelques millimètres. Par ailleurs, le tube devant recevoir le fil est préparé en y faisant un fond qu'on ouvre au diamètre de l'enrobage et on soude par fusion.

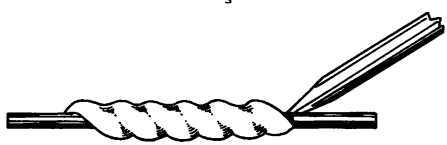


Fig. 17. - Enrobage d'un fil métallique.

Le platinite est un ferro-nickel qui se soude aux mêmes verres que le platine.

Le copper-clad, ferro-nickel recouvert de cuivre, se soude aussi aux mêmes verres. Il ne doit pas être soudé en chauffant à l'air, mais placé dans un tube capillaire que l'on fond sur le fil.

Dans tous les cas, une fois l'enrobage effectué sur le fil, il faut le réchauffer lentement avant de faire la soudure.

Autres métaux.

Tous les autres métaux utilisés couramment se recouvrent, par chauffage à l'air, d'une couche d'oxyde qui forme avec le verre un silicate fusible donnant une adhérence parfaite. Il est donc toujours nécessaire de commencer l'opération par une oxydation du métal, sans laquelle la soudure est tout à fait aléatoire.

Cuivre : Le cuivre peut être soudé au cristal moyennant des précautions particulières : les coefficients de dilatation étant différents, on se sert de l'élasticité du cuivre, qui doit donc toujours être très mince (taillé en biseau) à l'endroit de la soudure, ce qui fait que l'on ne soude guère que des tubes de cuivre. Le métal est chauffé à noircissement et le tube de verre amené en contact avec l'extrémité amincie du tube, le verre étant à l'extérieur. On chauffe et assure l'adhérence des deux pièces en appuyant un charbon sur le verre, tout en faisant tourner la pièce. Au refroidissement, la soudure devient rouge; on doit ensuite procéder au recuit habituel.

Ferro-nickel-cobalt et Molybdène : Ces métaux se soudent bien au verre Moly et au verre E. Le ferro-nickel doit être chauffé jusqu'à obtention d'une teinte grise; le molybdène doit être chauffé seulement au rouge sombre, une température trop élevée provo-

quant l'apparition de petits cristaux qui nuisent à l'adhérence du verre. On procède à l'enrobage et à la soudure à la manière habituelle.

Tungstène : Il se soude bien aux verres suivants : B 40, 702 P, Sibor, Pyrex, pour de petits diamètres (inférieurs à 1 mm.). On chauffe le métal au rouge blanc pour obtenir une bonne oxydation, se traduisant par une coloration gris verdâtre uniforme, puis on l'introduit dans un tube mince à frottement doux. Celui-ci est fondu sur le métal, en partant d'une extrémité; on sort la pièce de la flamme pour vérifier sa couleur : il apparait des points dorés qui gagnent en surface, et, en fin d'opération, on doit avoir une couleur dorée aussi uniforme que possible. On vient ensuite souder le morceau du tube fondu en place à la manière habituelle.

Le commerce livre des alliages de coefficients de dilatation variant entre de larges limites et soudables à tous les verres usuels.

On pratique souvent dans l'industrie des soudures par pincements, en particulier pour les lampes de radio : le fil métallique est placé dans un tube de verre que l'on serre à la pince pour assurer l'adhérence. Cette technique est difficilement applicable avec sécurité au laboratoire, en raison de la nécessité d'un recuit très sérieusement contrôlé, l'opération produisant dans la pièce des tensions internes très grandes.

Une variante consiste à pincer le tube de verre sur un enrobage; on peut alors se contenter d'un recuit moins délicat, en se servant de la flamme molle.

FABRICATION D'UN VOYANT A DÉCHARGE

Cette application, d'une utilité fréquente dans les laboratoires de Physique, peut être réalisée de la manière suivante :

On peut parfois se contenter de deux passages verre-métal effectués aux extrémités d'un tube de la manière indiquée précédemment. Toutefois, si le voyant doit servir souvent, on préfère utiliser des électrodes d'aluminium, celui-ci donnant lieu à une moindre pulvérisation; dans ce but, on se sert d'une plaque circulaire, munie d'un embout que l'on pince à chaud à l'extrémité d'un gros fil de tungstène et celui-ci est ensuite soudé au Pyrex. Pour les électrodes de Platine, métal plus malléable, et en général d'un faible diamètre, il est nécessaire de soutenir l'électrode par un petit tube de verre qui vient coiffer l'embout d'aluminium et que l'on soude sur l'enrobage de platine (fig. 18).

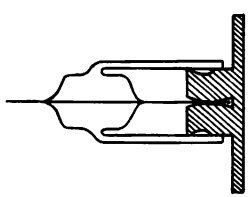


Fig. 18.- Electrode de voyant à décharge.

Pour le contact électrique extérieur, en raison de la fragilité de l'électrode métallique, il est intéressant d'entourer celle-ci d'une hélice de fil de cuivre sur laquelle on laisse tomber une goutte de soudure à l'étain maintenant le tout. On peut alors commodément installer un conducteur.

SOUDURE SUR PLACE (Fig. 19)

Ce genre de travail exige le même matériel que précédemment, le chalumeau fixe étant remplacé par un chalumeau à main : pour le Pyrex "gaz-oxygène petit modèle" et pour le verre ordinaire "chalumeau à main de souffleur". De plus, il faut se munir de baguettes de verre de 3 à 4 millimètres de diamètre.

Il est recommandable de se servir uniquement de supports métalliques, car il est toujours difficile d'empêcher la flamme du chalumeau d'atteindre les supports; les planchettes de bois, souvent utilisées, n'y résistent pas. En particulier, il est commode de constituer un bâti en tube de fer soudé à l'autogène.

Une des deux parties de l'installation doit être très solidement fixée, l'autre partie ayant un certain jeu pour faciliter la répartition du verre. La fixation définitive se fait après l'opération, en ayant soin de ramollir la partie de la canalisation susceptible d'être soumise à une contrainte. Toutefois, il faut prendre garde de ne pas chauffer de part et d'autre d'une soudure, ce qui risquerait de la soumettre à des efforts dangereux.

Pour pouvoir souffler les soudures, il est évidemment nécessaire de fermer tous les orifices, et il est commode d'isoler si possible les grandes capacités. Les robinets risquant

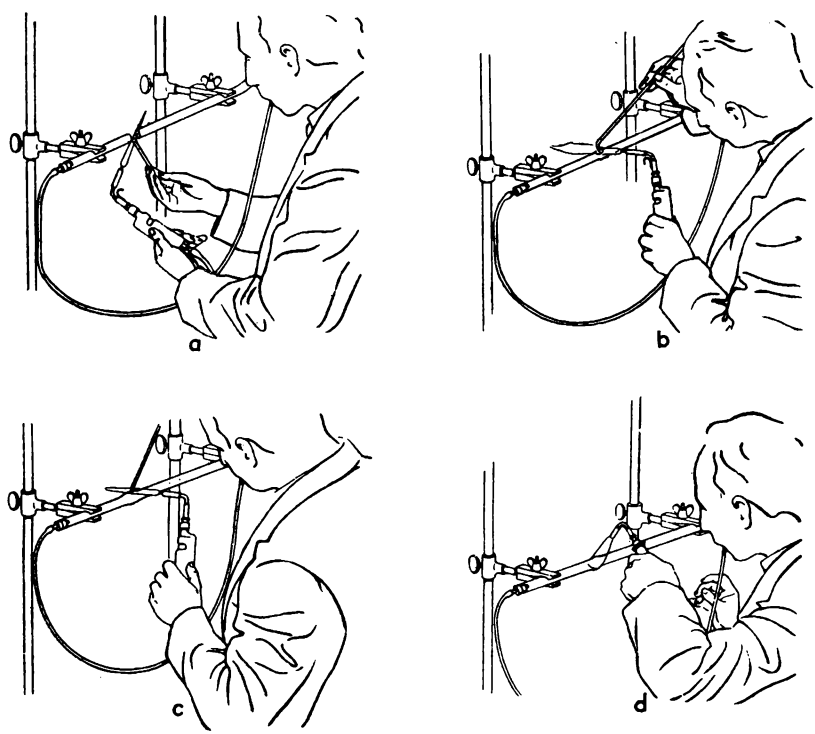


Fig. 19. - Soudure sur place.

d'être atteints par la flamme sont dégraissés soigneusement au benzène et entourés extérieurement de corde d'amiante. Le dégraissage est particulièrement important pour les rodages verticaux, qui, sans cette précaution, risqueraient de se coincer. Enfin, il est prudent d'installer des écrans, feuilles de tôle ou amiante pour protéger de la flamme les soudures internes et toutes parties délicates.

Les pièces à raccorder étant nettoyées, on les chauffe progressivement et on commence à souder les endroits les moins accessibles; avec une baguette de verre,on ramène le verre des parties trop épaisses aux parties les plus minces, puis on fond par points séparés pour égaliser les épaisseurs par soufflage et bien dégager la soudure, en s'assurant qu'elle ne présente pas de trous. Un chauffage général en fin d'opération permet de régulariser la forme.

Pour rapporter du verre, on chauffe la baguette un peu plus que la pièce sur laquelle on veut l'appliquer et on l'étire en remontant, le verre chaud ayant tendance à couler vers le bas. On chauffe ensuite la goutte qui s'est formée et on souffle en enlevant le chalumeau. En règle générale, il est recommandé au débutant de ne jamais souffler une pièce au feu, ce qui produit inmanquablement des amincissements et même des ouvertures. Les travailleurs expérimentés obtiendront de bons résultats en soufflant et aspirant légèrement le verre très ramolli dans la flamme.

Pour enlever du verre, on chauffe la baguette un peu plus que la pièce, on l'y colle et tire vers le haut pour ensuite rattraper par soufflage la goutte qui reste.

Pour les gros diamètres, il est nécessaire qu'un aide prenne un second chalumeau afin d'éviter que la soudure ne se refroidisse en cours d'exécution. Dans cet ordre d'idées, il est facile de faire au chalumeau à main de grandes soudures en forme de vase Dewar; le tube intérieur est évasé au diamètre du tube extérieur, puis on colle en déplaçant le chalumeau, les deux verres étant amenés au contact au moyen d'un charbon; la soudure est ensuite dégagée par les méthodes habituelles. Dans ce travail, un aide doit prévenir le verre avant la soudure.

Une fois la soudure terminée, on procède à un recuit comme indiqué plus haut, qui ne doit pas se limiter à la soudure seule, mais s'étendre sur au moins 2 centimètres de part et d'autre.

RÉPARATION DES FÊLURES

L'endroit fêlé est prévenu avec une flamme éclairante, puis on ajoute petit à petit de l'air ou de l'oxygène suivant le verre et on commence à attaquer la pièce dès que la flamme devient d'une teinte rosée. Il arrive que la fêlure se recolle sans difficulté; si ce n'est pas le cas et qu'il se produise une ouverture, on vient coller au point haut de celle-ci une baguette un peu épaisse laissant une grosse goutte de verre, à partir de laquelle on fera un stoppage progressif en y raccordant les bords de l'ouverture. Lorsque celle-ci est entièrement recouverte de

verre, on refond et enlève l'excès de verre, puis on égalise les épaisseurs par chauffage et soufflage.

Le cristal se fêle très facilement et il faut, avec ce genre de verre, prendre beaucoup de précautions; on le chauffe en flamme éclairante et, si la fêlure continue, il faut la suivre très lentement en la laissant s'ouvrir ou se fermer spontanément. Si elle se referme, on donne de l'air à la flamme pour refondre le verre au fur et à mesure. Si elle s'ouvre, il faut attendre qu'elle ne se prolonge plus pour commencer l'opération.

TRAVAIL DE LA SILICE

Pour ce travail, il faut se protéger les yeux avec des verres fumés foncés, et se servir d'un chalumeau spécial à gaz et oxygène du genre de ceux utilisés pour la soudure autogène des métaux.

Les méthodes générales sont les mêmes que pour les verres, mais il faut toujours avoir soin de chauffer de part et d'autre de la soudure pour empêcher le dépôt de silice volatilisée. Il est absolument indispensable d'observer la plus stricte propreté dans le travail, les autres verres, les graisses, même celles des doigts, les oxydes, etc., laissant des traces indélébiles.

A l'inverse des autres verres, qu'il est exceptionnel de souffler au feu, on souffle la silice dans la flamme, quand elle est portée au rouge blanc, car elle se solidifie très rapidement.

Pour faire des raccords avec des verres comme le Pyrex, il est nécessaire de se servir de verres de teneur en silice régulièrement croissante; en particulier on ne peut réaliser aucun passage étanche d'électrodes métalliques dans la silice et on doit passer par l'intermédiaire de tels raccords.

Pour le tungstène, on peut opérer de la manière suivante : on prépare un capillaire de silice de diamètre intérieur un peu plus grand que le fil à sertir (qui ne doit pas être oxydé au préalable), on munit chacune de ses extrémités d'un tube plus gros, l'une est fermée et on fait le vide de l'autre côté; le capillaire est alors chauffé avec la flamme oxhydrique et la silice vient s'appliquer sur le fil et y adhérer. Toutefois, un tel passage ne constitue pas une véritable soudure et on assure l'étanchéité par un joint de mercure ou encore de la picéine.

De même, on peut réaliser des entrées de courant avec des électrodes d'invar rodées sur la silice, l'étanchéité étant encore assurée dans ce cas par du mercure ou un mastic.

Un problème courant consiste à fixer une glace transparente de silice : on prépare un tube au diamètre de la glace, assez long pour qu'il déborde de 15 millimètres sur celle-ci. La tranche de la glace est polie et nettoyée soigneusement pour éliminer toute trace de rouge d'Angleterre. On met la glace en place, vérifie le parallélisme et effectue la soudure en chauffant le tube à l'extérieur, la glace étant protégée de la flamme par l'excédent de longueur du tube. Une fois la soudure terminée, la partie dépassante du tube est usée par rodage, par exemple avec une meulette de dentiste montée sur flexible.

AJUSTAGE D'UN RODAGE

Pour reconnaitre la qualité d'un rodage, on le débarrasse de sa graisse et trace sur la partie mâle un trait de crayon suivant une génératrice. Les deux pièces sont mouillées légèrement et, en les tournant l'une dans l'autre, le trait de crayon doit s'effacer entièrement. Si ce n'est pas le cas, c'est que toute la surface ne porte pas et il faut user les bosses là où le trait s'efface.

Dans ce but, les deux pièces étant mouillées, on place une pincée d'émeri ou de carborundum bien calibré à l'endroit à user, puis on fait tourner les deux pièces l'une dans l'autre, en un mouvement de va-et-vient, en les appliquant dans un sens et les écartant légèrement dans l'autre. Cette opération est poursuivie jusqu'à ce que l'essai indiqué plus haut soit satisfaisant.

Une retouche très fréquente est celle des robinets, dont la clé est souvent plus ou moins conique que le boisseau, il faut alors user la partie qui porte, c'est à dire l'extrémité étroite ou l'extrémité large suivant le cas.

Il faut toujours, après une telle opération, laver les pièces à fond pour éliminer tous les grains d'émeri, avant de remettre de la graisse. Un bon procédé consiste à laver à l'eau savonneuse avec un goupillon pour obtenir une mousse abondante qui entraine toutes les particules.

Signalons qu'on obtient une usure très rapide du verre, pour dégrossir un rodage par exemple, en mouillant l'abrasif avec une solution de camphre dans l'essence de térébenthine. Ce mélange est intéressant également pour découper un disque dans une plaque de verre. Celle-ci devra être soigneusement recuite au préalable, puis on vient user une couronne circulaire au moyen d'un tube de cuivre rouge monté sur une perceuse, en mouillant avec quelques gouttes du mélange.

TROISIÈME CHAPITRE

TECHNIQUE DU VIDE

par

J. SURUGUE

Professeur à l'École Supérieure de Physique et Chimie

TECHNIQUE DU VIDE

GÉNÉRALITÉS 89
Pression limite 89
Vitesse de pompage 91
Canalisations 93
Mesure du débit d'une pompe. 94

POMPES A VIDE PRÉLIMINAIRE 95
Pompes à palettes 95
Trompe à eau 97

POMPES A VIDE ÉLEVÉ 99
Pompes à diffusion 99
Pompes à vapeur de mercure 100
Pompes à huile 102
Pompe moléculaire Holweck 104
Trompe à chute de mercure 105
Amélioration du vide par absorption des gaz. 106

APPAREILS A VIDE EN VERRE 106
Considérations générales. 106
Masticages et scellements 108
Recherche des fuites. 110

APPAREILS MÉTALLIQUES 111
Considérations générales 111
Recherche des fuites 111
Joints 112
Rodages. 113
Joints plastiques 113
Joints élastiques 116
Robinets et vannes 118
Dégazage des pièces 120

MESURE DES BASSES PRESSIONS 122
Manomètre à mercure 122
Voyant à décharge 124
Jauge de Mac Leod 125
Jauge de Pirani 127
Jauge d'ionisation 128
Manomètre absolu de Knudsen 130
Manomètre à fibre de silice vibrante. 130

TROISIÈME CHAPITRE

TECHNIQUE DU VIDE

GÉNÉRALITÉS

Pression limite.

Deux notions importantes dans toutes les questions de vide sont celles de la pression limite et du temps nécessaire pour l'obtenir.

La pression limite est fonction des pompes employées et du récipient à vider, ce dernier intervenant, soit par la tension de vapeur de ses parties constitutives, en particulier la graisse des robinets et rodages, soit par des fuites pouvant être microscopiques. Il est certain que les fuites risquent d'être d'autant plus grandes que les raccords sont plus nombreux, et on peut être conduit pour cette raison à employer des pompes à très grand débit dans des appareils comportant de multiples joints si l'on ne veut pas être à la merci d'une très petite fuite accidentelle.

C'est la tension de vapeur des souillures des appareillages qui limite le plus souvent le degré de vide qu'on peut obtenir. Il ne faut pas perdre de vue que la plus petite parcelle de matière vaporisable donne un volume considérable de vapeur à basse pression, son élimination par pompage est donc extrêmement longue. Tout d'abord, il est indispensable dans toute installation de vide d'éliminer l'eau, toujours présente dans les appareils métalliques comme dans les appareils de verre. On emploie le plus souvent l'anhydride phosphorique, qu'il faut avoir soin de placer dans un récipient (nacelle de porcelaine) pour que le liquide sirupeux formé par hydratation ne coule pas. Il se présente sous la forme d'une poudre et, au moins lorsqu'il est tout neuf, il peut être entrainé par le courant d'air au début du pompage. Aussi faut-il éviter de le placer dans la canalisation principale (fig. 1), sinon, il faudrait le mettre entre deux tampons de coton de verre, ce qui réduit beaucoup la vitesse de pompage, ou le fondre et le couler sous forme de bâtonnets, ce qui réduit sa surface et partant sa vitesse d'absorption.

C'est un produit très corrosif qu'on aura soin de prendre dans son flacon au moyen d'un tube à essai pour ne pas souiller le col rodé, qui perdrait alors toute étanchéité. Les autres desséchants courants (SO_4H_2, $CaCl_2$, etc.), sont sans intérêt pour le vide,

sauf le gel de silice, un peu moins énergique que l'anhydride phosphorique, facile à rénover par chauffage à 250°, et ne produisant aucune souillure ni attaque d'aucune sorte, mais dont la capacité d'absorption en vapeur d'eau n'est pas toujours constante.

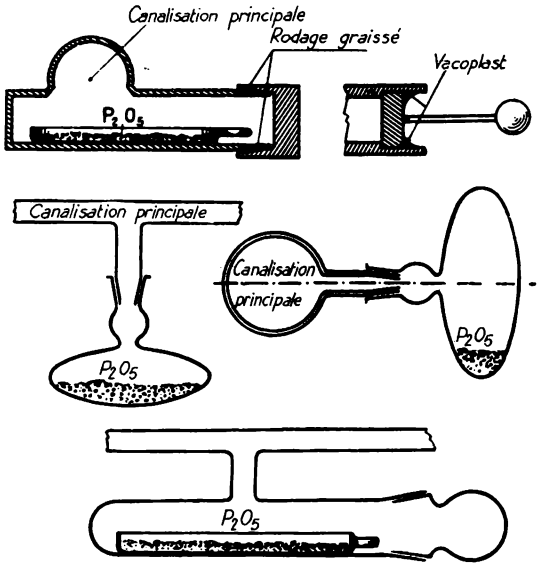


Fig. 1. - Disposition de desséchants.

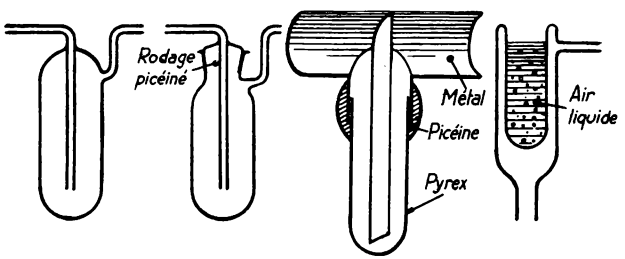


Fig. 2. - Pièges à condensation.

On peut aussi utiliser avantageusement la potasse fondue, en pastilles ou en bâtonnets.

Les autres souillures, telles que mercure, graisse, mastics, etc., ont une tension de vapeur de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} mm. de mercure.

C'est donc pour ces degrés de vide qu'elles deviennent gênantes. Il est alors nécessaire de s'assurer de la parfaite propreté des canalisations; il faut réduire au minimum les surfaces de graisse et de caoutchouc exposées au vide. Les vapeurs qui sont tout de même produites sont condensées dans un piège à air liquide ou à neige carbonique (fig. 2), sans lequel il n'est guère pos-

sible de faire un vide excellent. Il faut d'ailleurs remarquer que dans de très nombreuses applications, on peut très bien se contenter d'une pression de 10^{-3} à 10^{-4} mm., ce qui permet de se passer très souvent de condenseurs à basse température. Le tableau 1 donne les tensions de vapeur de différentes substances susceptibles d'exister dans une installation à vide, à la température ambiante et à celles de la neige carbonique et de l'azote liquide, à employer de préférence à l'air liquide pour que la température obtenue soit plus basse (- 196°C avec l'azote et - 183°C avec l'oxygène) et aussi pour éliminer tout risque d'explosion, pouvant se produire lorsque l'oxygène liquide est mis au contact de substances organiques ou même simplement de poussières. Il permet de constater qu'il est suffisant d'utiliser la neige carbonique dans de nombreux cas, à condition d'absorber l'eau par un desséchant, mais que l'emploi de l'air liquide s'impose dès que l'on veut obtenir un vide de l'ordre de la barye.

Tableau 1.-

Tension de vapeur de quelques substances, en baryes :

Substance	Température °K		
	290°	195°	77°
Eau	27.000	1	10^{-4}
Mercure	1	4.10^{-6}	"
Gaz carbonique	"	"	10^{-4}
Ethane	"	"	100
Ethylène	"	"	10
Huiles à pompes mécaniques et graisses au caoutchouc	1	"	"
Huile à pompes à diffusion	10^{-4}	"	"

L'examen de ce tableau montre encore la nécessité de ne refroidir le piège que lorsque le vide est déja très bon, et que les vapeurs peu facilement condensables comme les hydrocarbures légers sont déja éliminées. Leur tension de vapeur étant encore très grande à la température de l'air liquide, il serait impossible; ou du moins extrêmement long, d'obtenir alors le vide maximum.

Signalons encore une précaution à prendre dans l'emploi de l'air liquide ou même de la neige carbonique : en se réchauffant à la température ambiante, les corps condensés s'évaporent de nouveau et envahissent, si l'on n'y prend pas garde, toute l'installation. Si cela doit être gênant, il faut donc intercaler entre celle-ci et le condenseur un gros robinet que l'on fermera lorsque le réfrigérant est enlevé.

Dans le cas où l'on doit retenir de grandes quantités de produits condensables, en particulier de l'eau ou encore des solvants organiques, il y a évidemment lieu de dimensionner très largement les absorbeurs et d'en mettre plusieurs en série.

Vitesse de pompage.

Le temps nécessaire pour obtenir la pression limite dépend essentiellement du débit de la pompe utilisée, toujours exprimé en

volume d'air évacué du récipient, et indépendant de la pression dans de larges limites.

Soit D le débit de la pompe, c'est à dire le volume de gaz extrait par seconde, V le volume à vider, p la pression à l'instant t, p_0 la pression initiale et p_ℓ la pression limite. On a à chaque instant $\frac{dp}{p_0 - p_\ell} = \frac{D}{V} dt$, d'où :

$$p = p_\ell + p_0 e^{-\frac{D}{V} t}$$

Le tableau suivant donne les temps au bout desquels la pression atteint une fraction donnée de la pression initiale :

p/p_0	1/2	1/4	1/10	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
$t = \frac{V}{D} \times$	0,69	1,39	2,30	4,60	6,90	9,2	11,5

Examinons maintenant le cas fréquent de 3 pompes en série, une pompe à palettes, une pompe à vapeur de mercure et une pompe à vapeur d'huile, à débits respectifs, D_1, D_2, D_3 avec des pressions limites $P_{\ell 1}$, $P_{\ell 2}$, $P_{\ell 3}$, les deux dernières ayant des pressions d'amorçage p'_0 et p''_0. Supposons que les réchauds des pompes à diffusion soient mis sous tension en même temps que la pompe à palettes, de telle sorte que les pompes à diffusion s'amorcent dès que la pression atteint la valeur convenable. Le temps nécessaire pour que la pompe à palettes donne la pression p'_0 est :

$$t_1 = \frac{V}{D} \text{Log} \frac{p_0 - p_{\ell 1}}{p'_0 - p_{\ell 1}}.$$

Ici $p_{\ell 1} = 0,05$ mm., $p_0 = 760$ et $p'_0 = 15$,

d'où $t_1 = V/D_1 \times \text{Log } 50$,

de même, la pompe à mercure donne la pression p'' au bout du temps :

$t_2 = \frac{V}{D_2} \text{Log} \frac{p'_0 - p_{\ell 2}}{p'' - p_{\ell 2}}$ avec $p_{\ell 2} = 10^{-3}$ et $p''_0 = 0,02$, d'où $t_2 = V/D_2 \text{ Log } 750$

Enfin, la pompe à huile donne la pression p au bout du temps :

$t_3 = \frac{V}{D_3} \text{Log} \frac{p''_0 - p_{\ell 3}}{p - p_{\ell 3}}$ avec $p_{\ell 2} = 10^{-6}$. Pour $p = 2.10^{-6}$, on a :

$$t_3 = \frac{V}{D_3} \text{Log } 10.000.$$

Pour que les temps t_1, t_2, t_3 soient égaux, il faut donc que les débits des trois pompes soient entre eux comme les nombres : 1,7; 2,9 et 4 soit environ 5, 9 et 12. Le temps nécessaire pour obtenir une pression déterminée est naturellement proportionnel au volume à vider, et on a intérêt à choisir des pompes ayant des débits proportionnels aux nombres ci-dessus. En réalité, les pompes du commerce ne permettent qu'un choix restreint de débits, et il faut surtout retenir que le débit des pompes successives doit augmenter rapidement à mesure qu'on se rapproche du bon vide.

Canalisations.

Dans toutes les questions de vide intervient la notion de libre parcours moyen, valeur moyenne du chemin parcouru par une molécule entre deux chocs successifs, d'expression $l = \frac{1}{\sqrt{2}\,\pi n a^2}$ où n représente le nombre de molécules par centimètre cube et a le diamètre des molécules. Il est inversement proportionnel à la concentration, donc à la pression du gaz. A titre d'exemple et d'ordre de grandeur, l'azote donne : l = 9 cm. pour une pression de 1 barye ($0,75.10^{-3}$ mm. de mercure). Tant que le diamètre du tube est inférieur à 0,4 fois le libre parcours moyen, on peut appliquer la formule de Knudsen donnant la résistance d'une conduite rectiligne de longueur L et de diamètre d, c'est à dire l'inverse du débit propre (produit du volume de gaz circulant par seconde par la pression moyenne, la pression motrice étant 1 barye). Son expression est :

$$W = 1,59.10^{-3} \sqrt{\frac{273\,M}{T}} \left(\frac{L}{d^3} + \frac{4}{3d^2}\right) \text{sec.cm}^{-3}$$

Le terme $\frac{4}{3d^2}$ correspond à la correction due aux extrémités (écoulement dans un orifice en mince paroi). Pour une canalisation longue, il ne reste donc que le premier et il est facile de vérifier que pour l'air (M = 29) à T = 300°K, la formule se réduit numériquement à :

$$W = \frac{8L}{d^3} = \frac{L}{r^3} \text{ sec. litres}^{-1} \text{ (L et r en mm.)}.$$

Une pompe de débit propre S_0 vidant une capacité par l'intermédiaire d'une canalisation de résistance W a un débit réel S donné par $\frac{1}{S} = \frac{1}{S_0} + W$. Pour des valeurs un peu grandes du débit, le terme W devient très important et il faut par conséquent y prendre garde.

Pour un tube de L = 500 mm. et r = 10 mm., on trouve :

$$W = \frac{500}{1000} = \frac{1}{2},$$

c'est à dire qu'il réduit de moitié le débit d'une pompe de 2 l/sec.

Avec un diamètre deux fois plus petit, soit 5 mm., valeur tout à fait courante, on aurait W = 4, réduisant donc de moitié le débit d'une pompe de 0,25 l/sec. = 15 l/min.

En conséquence, il faut toujours utiliser des canalisations aussi larges que possible, et cela d'autant plus que l'on sert de pompes d'un plus grand débit.

Comme ordre de grandeur, nous donnons les diamètres d'une canalisation de 50 cm. de longueur réduisant de moitié le débit indiqué au-dessus.

Débit l/sec.	5	10	20	50	100	200
Diamètre mm.	27	34	43	58	74	93

De même, les pertes de charge sont relativement importantes dans les étranglements que constituent les robinets et aussi les tubes absorbants, pièges à air liquide et surtout tubes contenant un desséchant ou du charbon actif entre deux tampons de coton de verre. C'est ainsi qu'un robinet à voie de 3 mm. et de 15 mm. de longueur a une résistance de 4,44 égale à celle d'un tube de 10 mm. de diamètre et de 55 cm. de longueur. Il est donc indispensable de ménager toujours des grandes sections dès que la question temps intervient, c'est à dire lorsqu'on ne peut attendre des heures que l'équilibre de pression soit établi, et cela d'autant plus que la pression de travail est plus basse. Il faut également se méfier, en établissant un appareil, des régions pouvant former des poches dans lesquelles l'évacuation des gaz se fait difficilement; il faut veiller à les réduire le plus possible dans les appareils à vide élevé. C'est en particulier, le cas des vis dans les appareils métalliques (voir page 113).

Mesure du débit d'une pompe.

La définition donnée par GAEDE du débit est le volume de gaz extrait par la pompe durant l'unité de temps, mesuré à la pression de fonctionnement, soit :

$$S = -\frac{dV}{dt}.$$

Une méthode de mesure simple consiste à faire travailler la pompe sur un récipient de volume déterminé V et à mesurer la variation de la pression en fonction du temps. A un instant donné, on a : $pV = RT$, d'où $p\,dV - V\,dp = O$, soit :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V}{p}\frac{dp}{dt}$$

et l'expression du débit devient :

$$S = -\frac{dV}{dt} = -\frac{V}{p}\frac{dp}{dt},$$

facile à déduire de la courbe $p = f(t)$. Avec deux valeurs p_1 et p_2 correspondant aux instants t_1 et t_2, on a :

$$S = \frac{V}{t_2 - t_1} \operatorname{Log} \frac{p_1}{p}$$

Cette méthode a pour elle l'avantage de ne nécessiter qu'une expérience facile, mais présente l'inconvénient de se prêter très mal à des mesures à pression constante, alors que les pompes travaillent le plus souvent de cette façon.

Les mesures à pression constante exigent un montage et surtout des déterminations plus laborieuses.

Le meilleur procédé nous semble devoir consister à faire travailler la pompe en circuit fermé à travers un tube capillaire, de diamètre et de longueur variables suivant le débit de la pompe. Deux jauges, installées à chaque extrémité du tube, donnent la pression secondaire et la pression primaire, et lorsque l'état de

régime est établi, on peut calculer le débit au moyen des formules indiquées plus haut, soit pour l'air :

$$S = (p_1 - p_2)\frac{r}{L} \quad \begin{matrix}(r \text{ et } L \text{ en mm.}) \\ (\text{pressions en baryes})\end{matrix}$$

avec un tube assez long pour négliger l'influence des extrémités.

Cette méthode exige une installation parfaitement étanche, munie d'une ampoule à dessécher, et comportant de part et d'autre du tube un volume assez grand (plusieurs litres) servant de volant de pression.

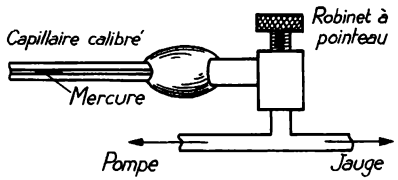


Fig. 3. - Robinet à pointeau.

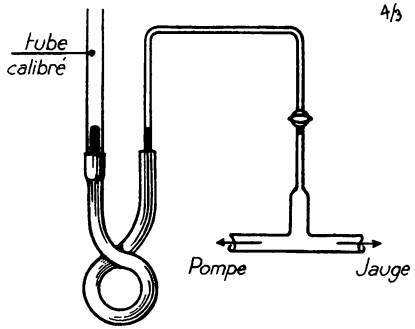


Fig. 4. - Tube capillaire.

D'autres méthodes ont été indiquées par des auteurs américains, consistant à mesurer un volume d'air à la pression atmosphérique, absorbé par l'intermédiaire d'un robinet à pointeau (fig. 3) ou d'un tube capillaire (fig. 4).

POMPES A VIDE PRÉLIMINAIRE

Pompes à palettes.

Les pompes capables de fournir un vide élevé ne peuvent, en général, fonctionner directement à partir de la pression atmosphérique, et exigent une pression d'amorçage relativement basse, de l'ordre de quelques millimètres de mercure au maximum. On utilise généralement des pompes mécaniques à palettes, dont le schéma est représenté figure 5. Le fonctionnement en est très facile à comprendre et ne nécessite pas d'explications particulières. La partie mobile est entrainée par un moteur électrique à une vitesse de 20 à 600 tours/min. Ce sont des appareils très sûrs dont la pression limite est de l'ordre de 1/20 mm. de mercure (une pompe neuve et tout à fait propre peut donner quelques millièmes de mm. de mercure).

Les pompes à palettes sont construites avec un ou deux étages, ce qui permet dans ce dernier cas d'atteindre comme pression limite à peu près la tension de vapeur de l'huile, soit 10^{-5} mm. de mercure avec une pompe tout à fait propre et 10^{-4} à 10^{-3} mm. de manière courante.

La pression limite est naturellement fonction de l'état d'usure mécanique de la pompe, mais surtout de l'état de l'huile, très souvent souillée par l'humidité ou des vapeurs facilement condensables comme le benzène, qui sert couramment au nettoyage des pièces et en particulier des joints graissés.

Il arrive très souvent dans les manipulations d'élèves, qu'à la suite d'un accident, la pompe aspire du mercure et même des débris de verre, qui ont naturellement une action très pernicieuse sur la pompe. Il est prudent, pour cette raison, d'installer toujours une capacité servant de fiole de garde entre la pompe et le reste de l'appareillage. Cette capacité a aussi l'intérêt d'éviter les conséquences des remontées éventuelles d'huile. Il est parfois avantageux d'utiliser un récipient de plusieurs litres, qui sert de réserve de vide et permet, lorsqu'il s'agit seulement de maintenir le vide dans une installation étanche, de faire fonctionner la pompe primaire d'une manière intermittente, les pompes suivantes débitant sur la réserve de vide.

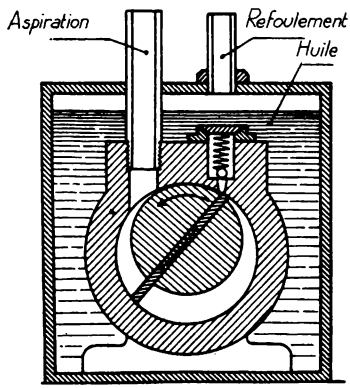


Fig. 5. - Schéma de pompe à palettes.

Lorsqu'on utilise la pompe à palettes devant une pompe à vide élevé, elle n'a pas besoin de donner un très bon vide et il n'est pas nécessaire de prendre des précautions particulières quant à l'huile de la pompe, mais il est des cas où l'on peut se contenter du vide fourni par la pompe à palettes seule. Pour un vide de l'ordre de 0,01 à 0,001 mm. de mercure, une pompe à palettes suffit et il est nécessaire d'accorder à la propreté de l'huile une grande attention. Le mieux est de vidanger la pompe pour faire bouillir l'huile sous vide, dans un grand récipient, par exemple, une fiole conique de 4 ou 5 litres, en raison de la mousse abondante qui se produit au début de l'opération, et qu'on réduit en faisant une légère rentrée d'air tant que la plus grande partie des impuretés volatiles n'est pas éliminée (fig. 6). Dans ce but, on se servira avantageusement d'une pince à vis serrant un caoutchouc fixé à un tube de verre traversant le bouchon de la fiole. On interrompt ensuite cette rentrée d'air pour faire baisser la pression et on chauffe progressivement jusqu'à une centaine de degrés, température qu'il est généralement suffisant de maintenir

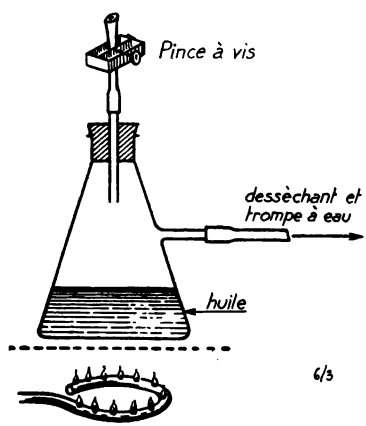


Fig. 6. - Traitement de l'huile.

pendant une demi-heure. Il est bon, avant de regarnir la pompe, d'en effectuer le rinçage avec un peu d'huile propre.

Lorsqu'une pompe à palettes est arrêtée en restant en communication avec le récipient à vider, l'huile pénètre dans le corps de la pompe et peut remonter dans la canalisation. Ceci présente deux inconvénients; d'abord la pompe est très dure à démarrer de nouveau, puisque l'huile qui la remplit doit s'échapper par le petit orifice servant normalement à l'évacuation de l'air. Cela peut avoir des conséquences graves pour le moteur d'entrainement ou le système d'accouplement. Ensuite, si un grand intervalle de temps s'est écoulé, l'huile, après avoir rempli le corps de la pompe, peut remonter dans la canalisation et souiller l'installation. Quand cet accident se produit, il est nécessaire d'aspirer toute l'huile remontée en tournant la pompe à la main. On lave ensuite la canalisation et la partie salie de l'installation avec du benzène qu'on essuie avec un petit chiffon, puis on sèche en y faisant circuler un courant d'air avant d'effectuer le remontage.

Certaines pompes sont munies d'un clapet de sécurité pour éviter cet inconvénient. Il peut se faire, notamment dans les machines moins récentes, que leur fonctionnement ne soit pas tout à fait sûr et il est alors prudent d'isoler l'appareil à vide de la pompe dès que celle-ci est arrêtée, en même temps qu'on fait rentrer l'air dans cette dernière.

Le débit de ces appareils est naturellement très variable suivant leurs dimensions et aussi leur vitesse de rotation, qui reste d'ailleurs au voisinage de 450 tours/min. Les types courants ont un débit de 60 à 300 litres par minute, soit 3,6 à 18 m^3 à l'heure. Il est à remarquer que le débit des pompes à palettes n'est pas très grand et diminue avec la pression, l'écoulement du gaz s'y faisant d'autant plus mal que la pression est plus basse. Cela joue surtout lorsqu'on veut approcher de leur pression limite. Si l'on peut obtenir avec un appareil tout à fait étanche une pression limite qui est la tension de vapeur de l'huile, la moindre petite fuite peut élever considérablement la pression limite, obtenue lorsque l'équilibre est atteint entre la rentrée d'air et l'évacuation de la pompe.

Trompe à eau.

En dehors des pompes à palettes, on se sert souvent dans les laboratoires de la trompe à eau dont le principe est bien connu. Il met à profit la dépression qui règne au niveau de la section la plus petite d'une veine liquide convergente puis divergente. C'est un appareil relativement simple à construire en verre, on en fait des formes très variées (fig. 7), mais il faut pour que le fonctionnement soit bon que la veine liquide soit bien centrée sur l'axe commun des deux ajutages et qu'elle touche bien le pourtour de l'ajutage divergent. On trouve aussi dans le commerce des trompes métalliques, qui ont l'avantage d'une grande solidité.

Il existe également des pompes aspirantes rotatives, dont l'emploi est assez rare dans les laboratoires de physique, mais qui, en raison de leur grand débit, peuvent recevoir des applications spécialement pour alimenter des installations d'aspiration.

La pression peut être abaissée avec une bonne trompe à eau jusqu'à un ou deux centimètres de mercure, suivant la température (8 mm. en hiver et 25 mm. en été). On l'utilisera donc chaque fois qu'on a besoin d'un vide sommaire (par exemple, manœuvre du mercure d'une jauge de Mac Leod), en ayant soin d'interposer une série de tubes desséchants, ou encore lorsque doivent se dégager des produits volatils nuisibles à une pompe à vide (par exemple, ébullition sous vide de l'huile d'une pompe à palettes).

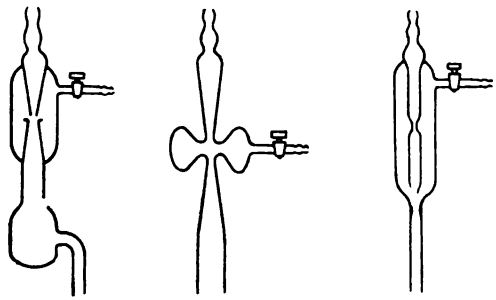


Fig. 7. - Modèles de trompe à eau en verre.

Une application de la trompe à eau est aussi la production d'un courant d'air, soit évidemment par aspiration, soit par refoulement (fig. 8) si c'est nécessaire (par exemple, barbotage dans un bain liquide pour l'agiter).

Il ne faut pas perdre de vue qu'une trompe exige pour son fonctionnement une grande quantité d'eau, un modèle courant ayant un débit de gaz de 6 litres/min., nécessite un débit d'eau de l'ordre de 0,3 m^3 à l'heure. L'installation d'une batterie de trompes ne peut donc s'envisager que si l'on dispose d'une assez large canalisation et aussi d'une pression suffisante (au moins 2 kg/cm^2 = 20 m. d'eau). Enfin, pour éviter les retours d'eau dans l'enceinte

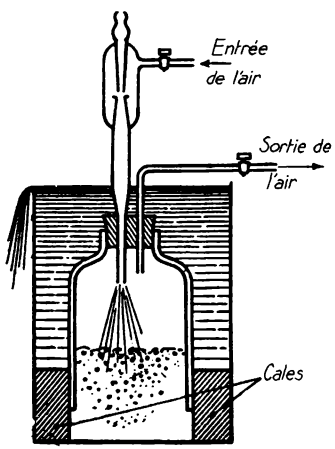


Fig. 8. - Production d'un courant d'air.

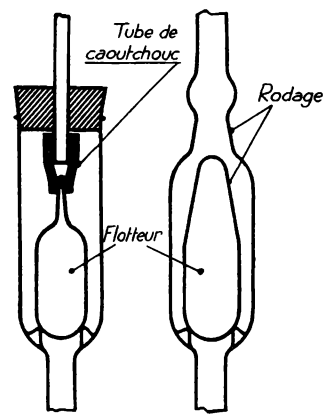


Fig. 9. - Clapet d'arrêt d'eau.

vidée en cas de baisse notable de la pression d'eau, il est bon de prévoir un dispositif comme ceux de la figure 9, avec un flotteur fermant le passage de l'air quand il est soulevé par l'eau. On peut d'ailleurs utiliser un dispositif analogue pour se protéger contre les remontées d'huile des pompes à palettes.

POMPES A VIDE ÉLEVÉ

Les pompes fournissant un vide élevé sont de deux catégories principales, les pompes à diffusion et les pompes moléculaires, présentant chacune leurs avantages et leurs inconvénients. Nous citerons également la trompe à chute de mercure, caractérisée par un débit très faible, mais pouvant être intéressante dans certains cas.

Pompes à diffusion.

Le principe de ces appareils est d'établir dans une enceinte en communication avec le récipient à vider un jet de vapeur à grande vitesse. Cette vapeur est produite dans une chaudière, puis canalisée dans un ajutage convenable. Les molécules de vapeur communiquent aux molécules gazeuses qu'elles rencontrent une impulsion qui les entraine vers une pompe préparatoire, puis elles viennent frapper les parois refroidies de la pompe, sur lesquelles elles se condensent pour retourner à la chaudière. Le fonctionnement d'une telle pompe n'est possible que si l'on établit au-dessus du liquide une pression assez basse, et cela pour deux raisons : il faut d'abord que le liquide se mette en ébullition à une température pas trop élevée, et il faut ensuite que le jet puisse se former, c'est à dire que les molécules de vapeur conservent en moyenne une vitesse sensiblement parallèle, donc ne subissent pas un trop grand nombre de chocs avec les molécules gazeuses.

Le fluide utilisé doit évidemment avoir une tension de vapeur très réduite à la température ordinaire. On emploie, soit le mercure, dont la tension de vapeur est environ 1 barye ($\sim 10^{-3}$ mm. de mercure), soit des huiles provenant de la distillation des pétroles ou des produits synthétiques, généralement des éthers-sels, tels que les phtalates et sébaçates de radicaux saturés, dont la tension de vapeur atteint 10^{-7} et même 10^{-8} mm. de mercure.

Les pompes à diffusion présentent cette propriété intéressante que leur débit est à peu près indépendant de la pression, au moins à partir d'une certaine valeur. En particulier, il reste pratiquement constant pour les très faibles pressions, au voisinage de leur pression limite.

De plus, leur débit, tout comme celui d'une canalisation ordinaire, varie avec la masse moléculaire du gaz, suivant $\frac{1}{\sqrt{M}}$. Par exemple, il est plus de trois fois plus grand pour l'hydrogène que pour l'air.

Pompes à vapeur de mercure.

Le mercure présente l'inconvénient grave de posséder une tension de vapeur relativement grande, de sorte que si l'on veut bénéficier de la bonne vitesse d'extraction de ces pompes, il faut, pour obtenir un vide élevé, leur adjoindre un piège à air liquide ou à neige carbonique. C'est naturellement une complication et, de plus de tels dispositifs réduisent notablement la vitesse de pompage.

Par contre, c'est un liquide que l'on peut sans aucun inconvénient porter à une température élevée, ce qui n'est pas le cas des huiles organiques. La température normale de la chaudière d'une pompe à mercure est de 100 à 120°C, mais si on la chauffe avant que la pression primaire soit suffisamment basse, la température peut atteindre une valeur notablement supérieure. Cela est dangereux pour une pompe à huile mais n'a pas de conséquences graves pour une pompe à mercure. De même, une rentrée d'air sur le mercure même chaud, est à peu près sans inconvénient, alors que l'huile est plus ou moins détériorée par cette opération. Enfin, le mercure retient une quantité de gaz relativement faible, de sorte que son dégazage est assez rapide.

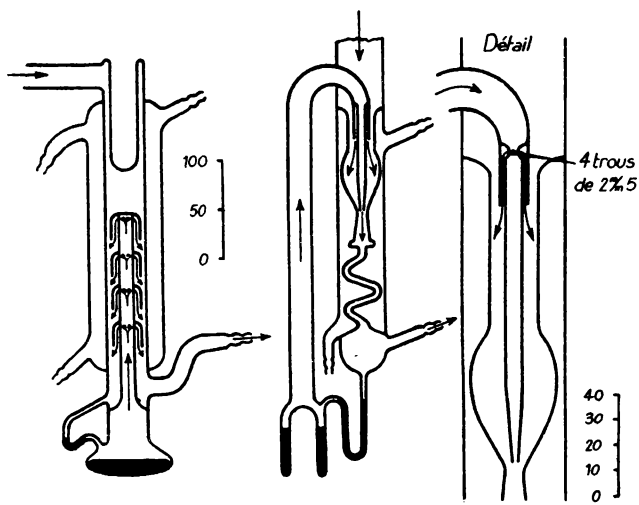


Fig. 10. - Croquis de pompes en verre à diffusion de vapeur de mercure.

Pour ces raisons de facilité d'emploi, on utilise couramment les pompes à vapeur de mercure, dont les modèles en verre sont d'ailleurs relativement faciles à exécuter, à condition de posséder une assez bonne habileté pour le soufflage du verre.

Précédée d'une pompe à palettes ordinaire, une bonne pompe à vapeur de mercure donne facilement, avec un piège à air liquide, 10^{-5} mm., et deux pompes en série donnent un vide suffisant pour la majorité des applications.

La figure 10 représente des types courants de pompes à mercure en verre. Le point délicat dans la construction est d'obtenir un jet de vapeur de forme correcte, frappant tout le pourtour de

l'ajutage de manière à empêcher toute diffusion entre les deux étages de vide autrement qu'à travers le jet de vapeur. La réalisation des modèles indiqués peut, le cas échéant, être modifiée dans le sens d'une plus grande facilité, par exemple en remplaçant les soudures du réfrigérant par des bouchons de caoutchouc.

Les appareils de verre ont un débit très variable suivant leurs dimensions. Comme ordre de grandeur, les anciens modèles courants du commerce ayant un orifice de sortie de la vapeur d'environ 2 mm. de diamètre ont un débit de quelques dizaines de cm^3/sec. On peut construire des pompes en verre ayant un débit de 200 à 5.000 cm^3/sec., avec des sections plus grandes, mais leur construction en est beaucoup plus difficile en raison de leurs grandes dimensions. Pour des débits plus importants, il est plus commode de se servir des pompes métalliques qui, avec le mercure, sont soumises à quelques sujetions, puisqu'il attaque les alliages de cuivre ainsi que les soudures à l'étain, plomb, etc. Cela oblige donc à n'employer que l'acier doux avec des soudures autogènes et celles-ci sont difficilement étanches directement. L'étanchéité au vide peut être assurée par de la soudure à l'étain appliquée à l extérieur (voir page 115).

L'industrie fournit des pompes métalliques donnant un débit de 20 à 120 litres par seconde (fig. 11).

Le vide préliminaire nécessaire est relativement peu élevé, puisque le fonctionnement débute vers 10 mm. de mercure pour un chauffage normal. En pratique, les pompes préliminaires sont presque toujours des pompes à palettes et on ne bénéficie guère de cet avantage. Cette propriété intervient surtout dans la vitesse de pompage, spécialement lorsqu'on doit faire le vide dans de grands volumes, puisque la pompe à mercure, d'un débit plus grand que la pompe à palettes s'amorce rapidement, bien avant que la pompe préliminaire ait atteint sa pression limite.

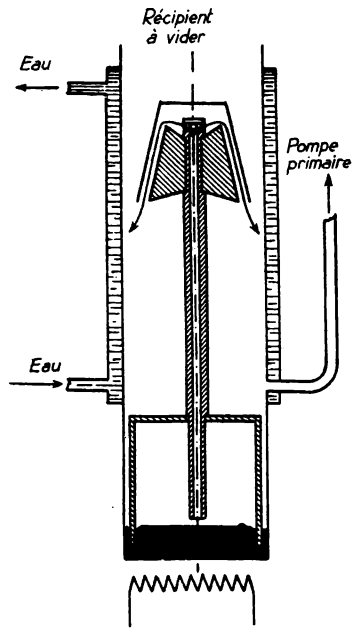


Fig. 11. - Schéma de pompe métallique à diffusion de vapeur de mercure.

Les pompes à mercure servent souvent d'étage intermédiaire entre une pompe à palettes et une pompe à huile, nécessitant un vide préparatoire relativement poussé (environ 10 baryes). La vapeur de mercure ne diffuse pas normalement d'une façon appréciable à travers la pompe à huile en fonctionnement, mais nous avons nous-mêmes constaté que ce passage peut néanmoins s'effectuer, en retrouvant des traces d'amalgamation sur des électrodes de cuivre ou d'aluminium.

Une diffusion importante de vapeur de mercure peut en réalité se produire en marche si la pompe à huile vient à se désamorcer, soit par rupture de la résistance de chauffage, soit en raison d'une remontée accidentelle de la pression, dûe à une fuite inopinée. Elle peut aussi avoir lieu au moment de la mise en marche, lorsque la pompe à mercure fonctionne déjà, alors que la pompe à huile n'est pas encore amorcée.

Dans les appareils où la présence du mercure est dangereuse et doit être prohibée, il faut donc éliminer ces pompes et les remplacer par des pompes à huile, c'est à dire qu'on se servira d'une pompe à huile pour amorcer la pompe finale, qui devra naturellement avoir un plus grand débit puisqu'elle travaille à pression plus basse.

Signalons enfin que le fonctionnement prolongé d'une pompe à vapeur de mercure conduit à une condensation notable de mercure en direction de la pompe préliminaire. Bien que les pompes à palettes modernes ne contiennent pas de métaux attaquables par le mercure, il est préférable d'arrêter celui-ci dans un piège constitué simplement par un assez long tube en U ou un ballon contenant de la tournure de cuivre.

Pompes à huile.

Le principe en est exactement le même que celui des pompes à mercure. Elles présentent seulement avec celles-ci des différences de construction tenant à la nature des liquides utilisés, qui sont des liquides organiques sensibles aux élévations de température et mauvais conducteurs de la chaleur.

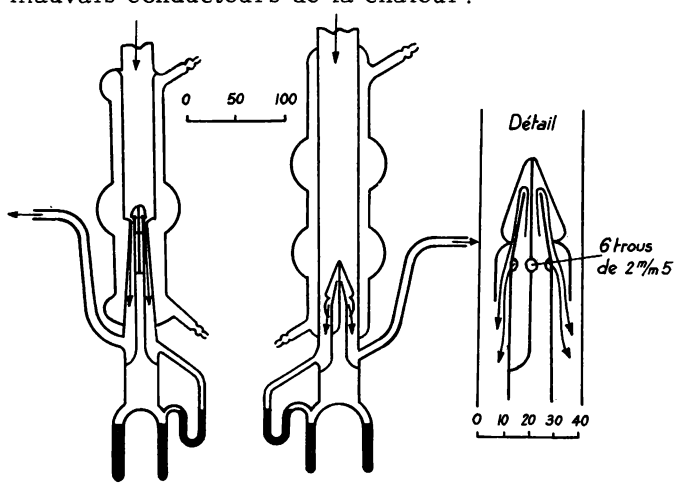


Fig. 12. - Croquis de pompes à diffusion de vapeur d'huile.

La chaudière où bout le liquide doit être chauffée assez uniformément et le départ de la vapeur doit pouvoir s'effectuer très facilement, aussi le chemin qu'elle emprunte doit-il avoir une très large section (voir fig. 12). Dans le cas contraire, la chaudière devrait être surchauffée pour assurer une vaporisation suffisante de l'huile, et celle-ci pourrait, de ce fait, subir une décomposition.

D'autre part, une telle pompe doit pouvoir être néttoyée aisément, l'huile se détériorant avec une grande facilité, soit par suite de rentrées d'air à chaud, soit par suite de chauffage prématuré, lorsque le vide préparatoire n'est pas suffisant.

Les pompes à huile en verre sont utilisées pour des débits atteignant au maximum 10 à 12 l/ sec. environ.

Elles présentent l'avantage commun de tous les appareils de verre d'être transparentes et de permettre ainsi un examen constant de l'huile, dont la couleur devient de plus en plus foncée à mesure que la décomposition s'avance. Peut-être sont-elles plus que les pompes métalliques susceptibles d'être le siège de surchauffes en raison de la mauvaise conductibilité thermique du verre. Elles présentent en tous cas un réel intérêt pour des débits pas trop élevés, car elles permettent sans air liquide d'obtenir une pression de 10^{-4} à 10^{-5} mm. de mercure.

Les pompes métalliques peuvent être réalisées beaucoup plus facilement que les pompes en verre, en toutes formes et dimensions, en particulier en ce qui concerne le jet de vapeur d'huile, et permettent d'obtenir couramment de très grands débits (120 l/ sec. en France, plusieurs centaines de l/sec. en Amérique). Il faut ajouter à cela leur plus grande facilité de démontage et leur solidité mécanique, qui rendent leur emploi extrêmement répandu. Des progrès récents, consistant dans l'emploi d'éthers-sels à très basse tension de vapeur et grande résistance chimique d'une part, et dans une construction nouvelle (en particulier dispositif à fractionnement) ont permis d'abaisser la pression limite à moins de 10^{-6} mm. et d'augmenter le débit jusqu'au m^3 par seconde.

Le métal généralement utilisé est le laiton, mais le cuivre catalysant la décomposition de l'huile, toutes les parties en contact avec l'huile chaude, en particulier le déflecteur (voir fig. 13), sont nickelées. Pour cette raison, il faut prendre garde, au cours des nettoyages, de ne pas enlever le nickel par grattage, en détachant les résidus solides qui y adhèrent fortement.

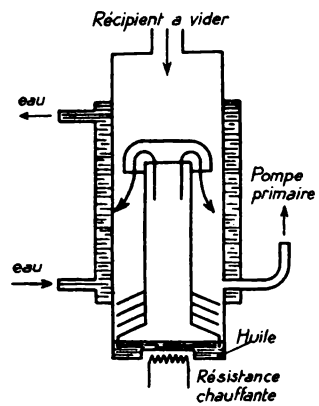


Fig. 13. - Schéma de principe de pompe métallique

Le démontage d'une pompe à huile est une opération tout à fait fréquente. On doit nettoyer les pièces soigneusement avec du benzène et les sécher complètement avant le remontage. Nous attirerons seulement l'attention sur la nécessité de veiller à ne pas faire tomber de parcelles de graisse ou de mastic sur la partie supérieure du déflecteur, car c'est une pièce qui chauffe passablement en fonctionnement, et cela donnerait lieu à une émission importante de vapeurs.

Pompe moléculaire Holweck.

Dans une telle pompe, les molécules gazeuses venant frapper un cylindre lisse tournant à grande vitesse (50 m/sec.) sont entrainées par lui et conduites dans un chemin hélicoidal jusqu'à la pompe préliminaire. La construction doit en être tout à fait soignée puisque le rotor et le stator sont à une distance de l'ordre de 0,03 mm. (fig. 14).

Le débit de cette pompe est de 2 à 5 litres par seconde, c'est-à-dire inférieur à celui des pompes métalliques courantes à diffusion. Un inconvénient est d'avoir une partie tournante : il arrive qu'il se produise un grippage, soit par dilatation consécutive à un échauffement, soit souvent par suite de l'introduction accidentelle d'une petite impureté, poussière ou parcelle de graisse. Le démontage de la pompe est relativement simple et un nettoyage du rotor avec de la toile émeri très fine remet tout en ordre.

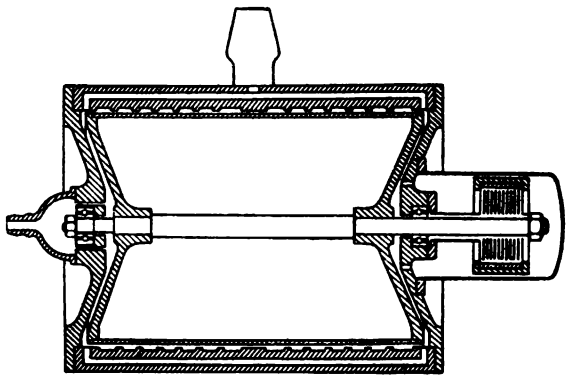


Fig. 14. - Pompe Holweck.

Les avantages, par contre, en sont sérieux, d'abord elle n'amène pas de vapeur supplémentaire et permet sans air liquide, dans une installation très propre, d'obtenir un vide excellent, seulement limité par les tensions de vapeur de l'installation elle-même.

De plus, elle est insensible aux rentrées d'air en pleine marche à la différence des pompes à huile, y résistant très mal.

Le rotor est muni en bout d'arbre d'une cage de moteur asynchrone, entrainée de l'extérieur par le champ magnétique tournant de deux paires de bobines alimentées en courant diphasé. L'étanchéité est assurée par une calotte mince de maillechort. Cette disposition très ingénieuse pourrait être utilisée dans d'autres appareils où l'on doit faire tourner une pièce dans le vide. Le passage d'un arbre moteur à travers une paroi étanche au vide est, en effet, d'une réalisation toujours difficile, lorsqu'il faut assurer un mouvement de rotation continu (voir p. 117). Il faut seulement, dans ce cas, prévoir une sérieuse démultiplication, car il n'est pas aisé d'avoir un nombre de pôles suffisant pour atteindre une vitesse de rotation inférieure à 750 tours/min. avec la fréquence industrielle.

Trompe à chute de mercure.

C'est un appareil d'un débit très faible (quelques cm^3/sec.), mais présentant un réel intérêt lorsqu'on doit recueillir les gaz extraits, puisqu'elle n'introduit pas d'autre impureté que la vapeur de mercure. Les pompes à palettes s'y prêtent assez mal, puisque les gaz barbottant dans l'huile peuvent s'y dissoudre en même temps qu'est entrainée de la vapeur d'huile. Le tube de chute a un diamètre de l'ordre du millimètre, il doit être d'autant plus étroit que le vide désiré est plus élevé, mais le débit diminue évidemment d'autant.

La trompe à chute ne nécessite pas de vide préliminaire. Les types en sont très variés, et dérivent plus ou moins du modèle de la figure 15.

Le mercure est remonté au moyen d'une trompe à eau qui aspire un chapelet de gouttelettes formées au moyen d'une petite rentrée d'air. On obtient celle-ci simplement en étirant une petite pointe qu'on coupe pour avoir une section d'environ 1/4 mm^2 pour une trompe à eau de modèle courant ou en plaçant à l'extrémité d'une petite tubulure latérale un tube de caoutchouc pincé.

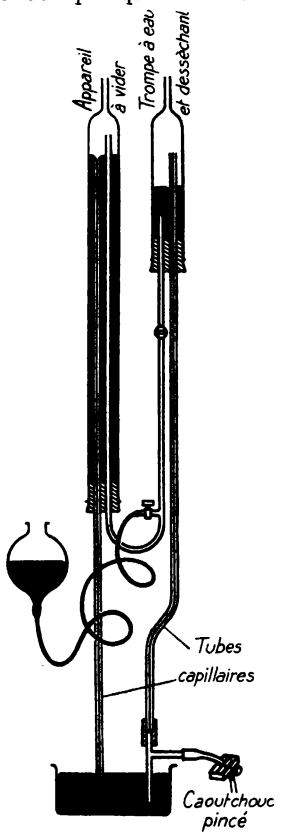


Fig. 15.- Trompe à chute avec remontée du mercure.

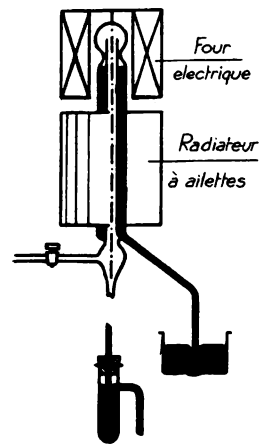


Fig. 16.- Appareil à distiller le mercure.

Un appareil un peu analogue est celui qui sert à distiller le mercure, dans lequel le vide est entretenu par une telle trompe (fig. 16). Cette opération; qui doit être pratiquée périodiquement lorsqu'on a besoin de mercure propre, est précédée, de préférence, d'un passage dans une solution nitrique de nitrate mercureux, les métaux pouvant être en solution dans le mercure (surtout Cu, Sn et Pb) déplaçant celui-ci de ses sels, suivi d'un passage dans l'acide sulfurique (fig. 17). Pour avoir une grande sur-

face de contact entre le liquide et le mercure, celui-ci est divisé en gouttelettes fines à l'aide d'un entonnoir dont la douille est effilée; dans l'entonnoir est placé un papier-filtre percé d'un petit trou, retenant les impuretés les plus légères, en particulier les poussières.

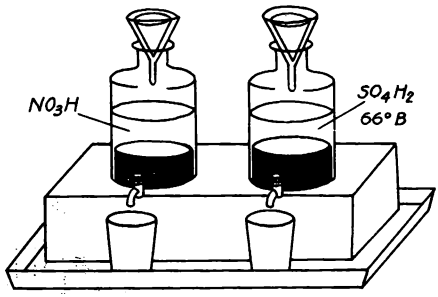


Fig. 17. - Lavage du mercure.

Amélioration du vide par absorption des gaz.

On a souvent intérêt à achever le vidage d'une installation ou d'un appareil, en absorbant les gaz résiduels, sans chercher à obtenir par pompage un vide très élevé. On peut utiliser dans ce but le charbon actif. Employé à basse température (air liquide), il constitue un absorbant énergique, mais il peut rendre des services même à la température ordinaire, si l'on a soin au préalable de le dégazer par chauffage sous vide (300 à 400°). C'est ainsi que, placé dans une installation de verre, il permet de maintenir une pression de quelques baryes pendant plusieurs jours, malgré le dégazage incessant du verre et des robinets.

On utilise pour vider les lampes de radio des "getters", petites capsules contenant un métal (baryum) que l'on vaporise par chauffage. La vapeur métallique se combine avec tous les gaz (sauf les gaz rares en très faible proportion dans l'air) et de plus le film métallique qui se dépose sur les parois constitue encore un absorbant efficace en raison de sa grande surface et de son extrême propreté.

Un tel procédé peut naturellement servir pour tout appareil devant être scellé.

APPAREILS A VIDE EN VERRE

Considérations générales.

Le verre est utilisé d'une façon courante pour toutes sortes de raisons : transparence, mauvaise conductibilité thermique et électrique, facilité d'effectuer des soudures, etc. Malgré la température relativement élevée qu'exige son travail, nécessitant de l'oxygène, le Pyrex est un verre facile à travailler et il est souvent avantageux de l'employer, de préférence aux verres plus mous (voir chapitre : "Soufflage du verre"). L'utilisation du verre n'est guère limitée que par le peu de commodité qu'elle offre pour les gros diamètres. Le travail n'en est en effet aisé que tant que le diamètre ne dépasse pas 2 ou 3 cm., valeur à peine suffisante dès que l'on veut travailler avec des pressions de l'ordre de 10^{-4}mm. de mercure et des débits notables (voir page 93).

Le schéma-type d'une installation de verre est représenté figure 18.

Il est toujours utile, spécialement lorsqu'on emploie du mercure (jauges de Mac Leod) de prévoir aux points bas des tubulures latérales terminées par une pointe étirée. Ces appendices permettent de recueillir le mercure pouvant monter dans les canalisations au cours d'une fausse manœuvre, et il est alors facile de l'éliminer. De plus, en cas d'accident nécessitant une rapide rentrée d'air, il est facile d'effectuer cette opération en brisant une pointe.

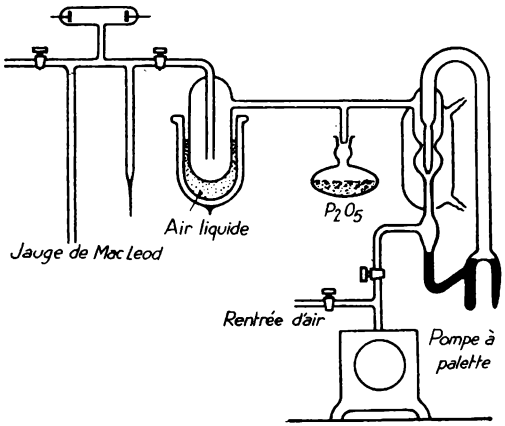


Fig. 18. - Installation type de vide en verre.

Signalons encore qu'on a parfois avantage à donner un peu d'élasticité au montage en courbant la canalisation de verre suivant un ou deux U.

Pour établir ou interrompre la communication, on se sert presque exclusivement de robinets. Les vannes à mercure (fig. 19-a) permettent d'utiliser une ouverture à peu près aussi grande qu'on le veut, mais elles présentent l'inconvénient d'être encombrantes et fragiles, puisque leur hauteur doit être d'environ 80 cm. Le mercure vient encore apporter ses propres inconvénients de manipulation et sa tension de vapeur élevée, exigeant l'emploi de pièges à air liquide quand on veut obtenir un très bon vide.

Un système moins encombrant et moins fragile est représenté figure 19-b. La fermeture est assurée par une petite cupule plongeant dans un bain circulaire de mercure. Elle est solidaire d'une petite pièce de fer que l'on peut manœuvrer à l'aide d'une bobine électrique extérieure entourant l'appareil.

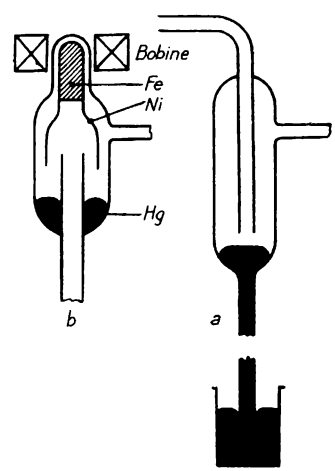


Fig. 19. - Vannes à mercure.

Nous ne saurions trop insister sur l'intérêt qu'il y a à se servir de robinets à très grosse voie, au moins dans le circuit prin-

cipal de vide, car ce sont souvent les robinets qui réduisent le plus le débit des appareils. Remarquons de plus que les robinets sont souvent graissés beaucoup trop généreusement et que l'excédent de graisse vient alors les obturer en partie, ce qui augmente encore énormément leur résistance. Le graissage d'un robinet, comme celui de tout autre rodage, doit toujours se faire avec économie, la graisse étant apportée en petites quantités et étalée uniformément avec le doigt. L'examen des rodages de verre est rendu facile par leur transparence, qui permet de se rendre compte immédiatement de la continuité du film de graisse.

La fabrication de la graisse à robinets au caoutchouc est une opération longue et ennuyeuse (dissolution lente au bain-marie de gomme pure dans un mélange à poids égal de vaseline et de paraffine, en ajoutant progressivement le caoutchouc pour obtenir une masse s'étirant en fils entre les doigts par refroidissement à la température ordinaire). On utilise le plus généralement les graisses du commerce, mais on peut avoir intérêt à leur faire subir de nouveau les derniers traitements de leur fabrication, soit qu'ils aient été mal faits, soit qu'un séjour prolongé dans une boite les ait souillées. Ces traitements consistent en une filtration à chaud sur papier-filtre (entonnoir à filtration chaude), puis un dégazage en maintenant sous vide (pompe à palettes à double étage) pendant une trentaine d'heures à une température d'environ 50°C.

Masticages et scellements.

Le raccord de deux pièces de verre se fait de préférence par soudage, une bonne soudure ayant une étanchéité parfaite; mais, si le démontage est nécessaire, ou si les appareils à réunir sont faits de verres différents, on est obligé d'utiliser des rodages ou des masticages. Les rodages sont presque toujours des rodages coniques, mais on peut parfois se servir pour le raccord de deux tubes de rodages plans en usage chez les chimistes. L'étanchéité est assurée s'il y a lieu par un cordon de cire molle appliqué sur la périphérie, les deux pièces du rodage étant maintenue appuyées l'une sur l'autre au moyen de deux pinces à ressort (fig. 20-a).

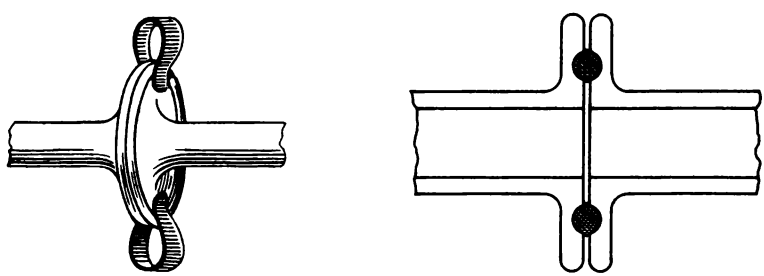


Fig. 20.- Raccord de deux tubes :
a. rodage plan, b. joint torique.

Une variante de grande commodité consiste à remplacer le rodage par un joint torique. Chacune des deux pièces de verre porte une gorge circulaire dans laquelle est serré un anneau de caoutchouc moyennant trois étriers à vis (fig. 20-b).

Les mastics durs à la température ordinaire permettent de réaliser des assemblages d'une bonne résistance mécanique. Parmi ceux-ci, signalons trois produits courants :

1° La picéine, produit noir se ramollissant à partir de 50° pour devenir liquide vers 80°, doué d'une certaine élasticité et, de ce fait, pas très sensible aux variations de température jusqu'à - 10°C environ. La picéine a une tension de vapeur très faible et peut être utilisée dans de très nombreux cas. Dans son emploi, on est seulement gêné pour deux raisons : elle reste dans un état pâteux relativement fluide, seulement dans une marge de température restreinte; sa couleur noire peut rendre difficile au débutant l'appréciation de la température qu'il ne faut pas dépasser, sous peine de lui faire subir un début de carbonisation, seulement décelée par le dégagement de petites bulles gazeuses.

Elle est soluble dans l'acétone et surtout dans le benzène, qui sert couramment pour nettoyer les pièces ayant été fixées par son intermédiaire.

2° Le mastic Régnier, produit brun clair qui se ramollit à une température d'environ 70-80°C, mais restant mou avant de se solidifier dans une bonne marge de température, ce qui permet de le pétrir plus facilement que la picéine pour confectionner un masticage.

Une température trop élevée se manifeste par la production de nombreuses petites bulles qui lui donnent un aspect plus clair; il faut donc s'arranger pour qu'au cours de l'opération le mastic ne change pas de couleur.

Il est d'une bonne résistance mécanique, mais moins élastique que la picéine.

3° Les mastics genre Khotinski, à base de gomme laque, obtenus en dissolvant celle-ci à chaud dans des huiles variées, comme l'huile anthracénique du goudron de houille, obtenue en séparant par refroidissement l'anthracéne des produits distillant au-dessus de 300°.

Ces mastics ne deviennent pas franchement liquides. mais ils présentent une élasticité élevée et supportent, de ce fait, sans inconvénient, de grandes variations de température. Chauffés trop vivement, ils prennent une couleur plus foncée.

L'utilisation des mastics peut se faire pour joindre des rodages, coniques ou plans - la picéine convient particulièrement bien dans ce cas - dont les pièces sont ainsi parfaitement fixées et peuvent même subir un certain effort de traction.

Pour faire un masticage, il faut avoir soin de chauffer les pièces à réunir, à une température suffisante pour que le mastic fonde à leur contact. La partie la plus importante de l'opération est d'assurer une bonne adhérence sur les deux pièces. Lorsqu'on doit déposer du mastic sur une pièce métallique, celle-ci est d'autant plus longue à chauffer qu'elle est plus volumineuse, et il faut s'assurer qu'elle est bien sèche au moment où l'on applique le mastic, la flamme commençant par y déposer une couche de buée qui disparait quand la pièce s'échauffe.

Une fois chaque pièce enduite d'une légère couche de mastic, la confection du masticage est assez simple, en réalisant l'une des formes de la figure 21.

Le masticage en olive est le plus délicat à réaliser; il faut chauffer modérément le bâton de mastic pour l'étirer par pétrissage entre les doigts (légèrement humides au besoin si le mastic à tendance à y adhérer) en un boudin mou avec lequel on entoure les deux tubes. On chauffe ensuite uniformément avec une flamme molle et on obtient la forme désirée par pétrissage. Une fois le mastic durci, on lisse sa surface en la léchant avec la flamme pour avoir une fusion superficielle donnant une surface bien unie (l'apparition d'une fêlure, par la suite, est ainsi rendue beaucoup plus visible).

Il arrive que, par suite de variations de température, le mastic se fendille; il suffit alors, en général, de chauffer légèrement sa surface pour lui rendre son étanchéité (la forme en cuvette est dans ce cas particulièrement intéressante, puisqu'elle permet d'opérer très facilement une fusion complète du mastic).

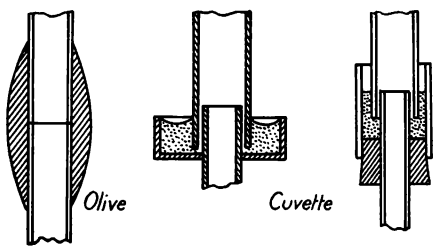


Fig. 21. - Types de masticage.

Recherche des fuites.

Dans les installations de verre, le procédé le plus simple consiste à établir dans la canalisation une décharge électrique pendant que l'on y fait le vide. Une des électrodes est une pièce métallique pénétrant dans l'appareil et l'autre un petit balai de fils de cuivre que l'on déplace aux endroits douteux. Lorsque l'électrode exploratrice est au voisinage d'un petit trou, celui-ci est traversé par une grande densité d'ions et apparaît comme un point brillant. La source utilisée est une bobine à vibreur donnant des pointes de tension à une fréquence de quelques centaines de cycles. Si l'on ne dispose pas d'électrode intérieure, on entourera la tubulure d'une feuille de clinquant de quelques centimètres de longueur pour constituer l'électrode fixe. La surface doit en être assez grande pour que le courant qui passe par capacité à travers le verre n'atteigne pas une densité dangereuse pour ce dernier. Il faut employer ce procédé avec précaution, car il est susceptible de percer le verre aux endroits de moindre épaisseur.

Nous verrons plus loin (page 111), d'autres procédés utilisés plus généralement avec les appareils faits de matériaux conducteurs ou opaques, pour lesquels ceci n'est pas praticable.

On est parfois gêné par des substances ayant une tension de vapeur suffisante pour faire croire à une fuite. Plusieurs procédés permettent de faire la distinction, en particulier : 1° essai de collectage des gaz évacués par la pompe primaire, qui ne donne rien dans le cas d'une vapeur; 2° utilisation d'un condenseur à basse température, faisant baisser immédiatement la pression des vapeurs. Une installation souillée par un produit à tension de vapeur gênante doit être nettoyée soigneusement et séchée avant remontage. Le solvant qui convient généralement est le benzène, mais il faut aussi penser qu'il peut ne pas dissoudre certaines impuretés.

APPAREILS MÉTALLIQUES

Considérations générales.

La technique des appareils métalliques pour le vide s'est beaucoup développée dans les dernières années, en raison des grands volumes nécessités par un certain nombre de travaux, tels que : étude spectrographique des radiations ultraviolettes de haute fréquence, spectrographie de masse, spectrographie de rayons β, accélération d'ions pour la radioactivité artificielle, accélération d'électrons et microscope électronique, etc.

Les métaux ont sur le verre les avantages d'une grande résistance mécanique et d'un usinage facile, permettant de réaliser à peu près toutes les formes et dimensions requises. Ils présentent, par contre, quelques inconvénients, comme leur opacité et leur conductibilité électrique et aussi une porosité plus ou moins grande exigeant certaines précautions.

Le métal le plus souvent utilisé est le laiton, s'usinant et se soudant facilement. Le laiton en planche n'est guère poreux, mais les pièces obtenues par moulage peuvent l'être beaucoup. De même, certains tubes étirés peuvent présenter des fuites. Une précaution très utile consiste à peindre tous les appareils métalliques en même temps qu'on y fait le vide, avec une bonne peinture bien adhérente et ne se craquelant pas, ou encore une solution épaisse de gomme laque.

Il ne faut pas oublier qu'un appareil où l'on fait le vide subit de la part de la pression atmosphérique des efforts parfois considérables et qu'il est nécessaire, pour éviter des déformations, de prendre certaines précautions mécaniques (voir chapitre : "Principes généraux de construction des appareils").

Recherche des fuites.

Pour rechercher des fuites d'un appareil, le plus simple, quand la chose est possible, est de fermer soigneusement et d'assujettir solidement les couvercles, bouchons, etc., en ménageant une tuyauterie pour y amener de l'air comprimé. Le tout est plongé dans l'eau comme on le fait d'une chambre à air de bicyclette. Cela permet de mettre facilement en évidence une fuite de l'ordre de $10^{-6} cm^3/sec.$, à condition qu'elle soit localisée et pas due à de la porosité.

Autrement, pour un appareil trop volumineux, une bonne méthode consiste à utiliser un voyant à décharge monté sur la canalisation reliant l'appareil à une pompe à palettes. On fait le vide et excite le voyant. Il prend avec l'air une couleur mauve, visible dans une grande marge de pression, de sorte qu'à moins d'avoir une fuite considérable, généralement repérable au bruit que fait l'air en y pénétrant, on est sûr que la décharge apparait. On déplace alors sur la paroi de l'appareil, spécialement aux endroits douteux, un tampon de coton imbibé d'alcool, en allant de bas en haut, de manière que si l'alcool mouille la paroi et ruisselle, il atteigne des régions déjà visitées. Au moment où la vapeur organique pénètre dans l'appareil, la teinte du voyant devient plus bleutée.

On peut aussi utiliser avec le voyant à décharge un petit spectroscope de poche. On observe normalement le spectre de l'air comportant dans le violet les bandes de l'azote. Si on promène devant la région douteuse un tube de caoutchouc amenant de l'hydrogène d'un tube, il apparait les raies rouge et bleue caractéristiques dès que le gaz pénètre dans l'appareil.

Pour les fuites tout à fait faibles, cette méthode peut n'être pas assez sensible et on peut procéder de la manière suivante :

Les pompes de l'installation étant en fonctionnement, la pression s'établit à une valeur très faible permettant une mesure à la jauge d'ionisation. Si l'on projette avec un vaporisateur de l'alcool en gouttelettes au voisinage de la petite fuite, au moment où celle-ci est obturée par le liquide, le courant d'ions baisse, puis remonte à une valeur supérieure lorsque les vapeurs se répandent abondamment dans l'enceinte vidée.

Ce procédé est d'un grand intérêt pour la vérification de l'étanchéité des nombreux joints que comportent certains appareils comme les tubes accélérateurs d'ions pour la radioactivité artificielle. On a aussi préconisé l'emploi de jets gazeux dont la présence fait varier l'émission électronique du filament ou l'ionisation dans la jauge, et dont le courant varie donc notablement lorsque l'endroit de la fuite est atteint par le jet gazeux (hydrogène, oxygène, butane).

Les jauges de Pirani et de Penning peuvent aussi être utilisées à la recherche de fuites par un procédé analogue, en particulier avec le butane.

On opère de la même façon avec un spectrographe de masse, remplaçant le spectroscope précédemment cité. On amène devant les régions douteuses une vapeur ou un gaz dont on est sûr de l'absence dans l'appareil, et les ions correspondants sont repérés.

Les recherches de fuites dans un appareil tout monté, constituent toujours une opération longue et fastidieuse. Aussi est-il indispensable de vérifier avant montage chacune des parties de l'appareil.

Plus encore que dans les installations de verre, il faut se méfier des "fausses fuites". On peut, en effet, rencontrer non seulement des tensions de vapeur, mais aussi des poches difficiles à évacuer : un métal peut mettre un temps très long à se dégazer et faire ainsi croire à une fuite, alors qu'il rend petit à petit de l'air absorbé. Dans le même ordre d'idées, il faut éviter tout ce qui constitue des culs-de-sac, comme les filets de vis, devant toujours être ouverts du côté du vide par un canal, ou la juxtaposition de pièces pouvant garder emprisonnées quelques bulles d'air.

On ne se livrera à la recherche des fuites que lorsqu'on sera certain, après un pompage suffisamment long, d'avoir éliminé la plus grande partie de l'air retenu par la masse de l'appareil.

Joints.

Une question délicate dans les appareils à vide est celle des joints indispensables pour assurer la réunion des différentes pièces. La technique du masticage a déjà été développée plus haut (page 108).

Rodages.

Pour des dimensions pas trop grandes, on peut avantageusement se servir des rodages graissés, dont la rigidité doit être absolue pour éviter toute déformation. Les rodages se font couramment sur les métaux et sur le verre, mais on peut également, tant que les dimensions des pièces ne sont pas trop grandes, roder des pièces isolantes en porcelaine, stéatite, etc. Les rodages coniques peuvent être utilisés jusqu'à un diamètre d'une dizaine de centimètres au maximum. L'angle habituel est de 7°. On ménage souvent une ou deux rainures pour loger l'excédent de graisse. Cela peut présenter l'inconvénient d'y emprisonner des bulles d'air qui sont parfois longues à éliminer. S'il y a danger à ce que des parcelles de graisse puissent tomber, il est bon de prévoir un rebord vers l'intérieur (fig. 22).

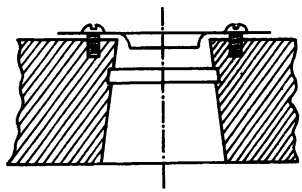


Fig. 22. - Rodage conique.

La graisse doit être mise en très petite quantité et étalée aussi uniformément que possible avec le doigt, puis les deux pièces du rodage appliquées en les glissant l'une sur l'autre dans un mouvement relatif de faible amplitude. Il est toujours plus difficile de faire tenir un rodage dont on ne peut déplacer les deux pièces l'une sur l'autre.

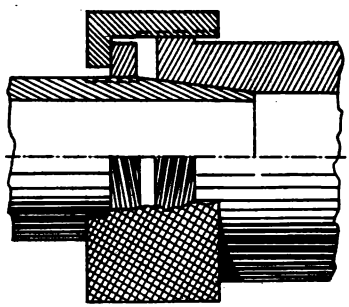


Fig. 23. - Fixation d'un rodage conique.

Le rodage peut être maintenu au moyen d'un écrou comme dans la figure 23.

Pour un rodage plan, le problème est rendu plus difficile, en raison de la déformabilité plus grande de la surface. Les deux plans graissés sont maintenus en contact par des boulons qui doivent être serrés avec précaution au moment du montage, pour éviter toute déformation (serrage progressif des boulons l'un après l'autre dans l'ordre indiqué figure 24a). Leur décollage sera effectué lors des démontages au moyen de vis (fig. 24b) à l'exclusion de tout autre procédé risquant de détériorer le rodage.

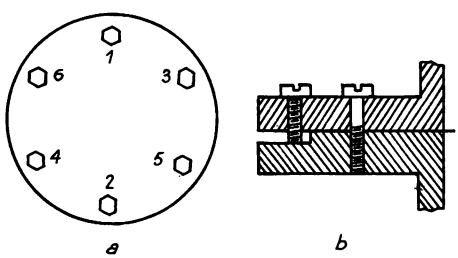


Fig. 24. - Vis de déblocage.

Joints plastiques.

Lorsque les dimensions sont grandes, les rodages plans ne sont pas pratiques à réaliser, car il faut pouvoir disposer pour les exécuter de grandes pierres abrasives planes, et ils demeurent facilement déformables, à moins d'employer des épaisseurs très grandes ou des profils renforcés.

Aussi se sert-on plutôt de joints platisques comportant un jonc de caoutchouc circulaire de quelques millimètres de côté serré dans une gorge (fig. 25).

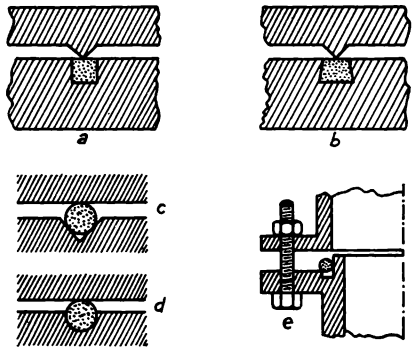


Fig. 25. - Joints de caoutchouc.

On a toute sécurité en plaçant deux joints concentriques et en faisant communiquer l'intervalle qui les sépare avec la pompe à vide primaire (fig. 26).

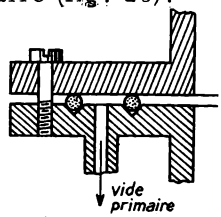


Fig. 26. - Joint double.

Ce type de joint peut naturellement aussi être utilisé pour des dimensions plus réduites de l'ordre de 1 ou 2 cm. Les types (a) et (b), sont particulièrement intéressants, en ce qu'ils permettent d'employer une lanière de caoutchouc que l'on peut découper facilement de la manière suivante : on se sert de deux lames de rasoir mécanique maintenues à l'écartement désiré par deux tiges filetées et des écrous et montées sur un manche (fig. 27) (avoir soin de mouiller les lames pour couper le caoutchouc).

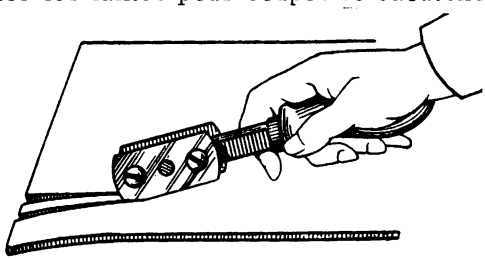


Fig. 27. - Découpage d'une lanière de caoutchouc.

La lanière est prise dans une feuille épaisse de caoutchouc (4 à 5 mm. pour un diamètre de 25 à 30 cm., moins pour des diamètres plus petits) et, avant de l'installer, on traite le joint à la soude bouillante pour éliminer le soufre en excès à la surface. Les extrémités sont naturellement taillées en biseau pour en permettre le recouvrement, puis collées si besoin est, c'est-à-dire lorsque les deux extrémités ne restent pas en place dans la gorge avant le serrage.

Le caoutchouc peut perdre des quantités considérables de gaz, spécialement les caoutchoucs de récupération de déchets, contenant des plastifiants plus ou moins volatils. Il est préférable de se servir de caoutchouc naturel avec le minimum de charge et de soufre et aussi d'opérer un dégazage avant l'emploi (voir page). Les caoutchoucs synthétiques ont un grand intérêt dans les cas où ils doivent être en contact avec de l'huile (joints pour l'huile) ou de la graisse (transmission de mouvements).

Dans certaines applications, comme les tubes accélérateurs d'ions à très haute tension, les joints sont faits sur des pièces qui peuvent chauffer. Il faut alors les refroidir très soigneusement, par exemple, avec une circulation d'eau ou d'huile qui sera, autant que possible, installée entre le joint à protéger et la source de chaleur (fig. 28).

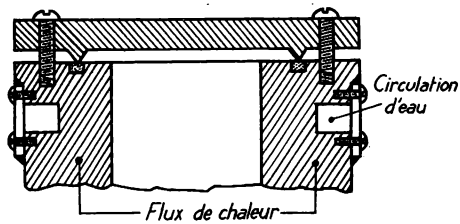


Fig. 28. - Joint refroidi.

Signalons, à ce propos, une difficulté qui peut se présenter : si on doit faire circuler de l'huile dans un conduit soudé à l'autogène, il est extrêmement difficile d'avoir l'étanchéité; cela est facile à constater à l'aide d'une feuille de papier à cigarette qui se tache aux endroits où il y a un suintement, même très faible. On recouvre la soudure à l'autogène d'une soudure à l'étain, qui bouche les petits pores, procédé à utiliser partout où l'étanchéité est nécessaire. Un procédé donnant toute sécurité consiste à faire passer l'huile dans un tube de cuivre emplissant une encoche pratiquée dans l'épaisseur du métal, l'interstice étant bouché par un alliage fusible (soudure) qui assure un bon contact thermique (fig. 29).

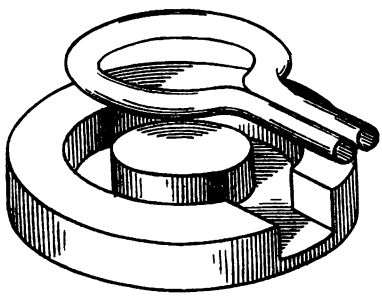


Fig. 29. - Installation d'un refroidissement par circulation de liquide

Il existe encore un cas où des précautions sont indispensables, celui où le joint de caoutchouc peut être soumis à un champ électrique élevé. Si une décharge s'amorce, il s'ensuit une destruction rapide du caoutchouc, et, pour le protéger, un bon moyen consiste à le recouvrir d'une gaine métallique de protection, en cuivre mince repoussé (fig. 30).

Il faut seulement prendre garde que l'anneau de caoutchouc remplisse bien la protection de cuivre, car si de l'air s'y trouve emprisonné, celle-ci peut claquer sous le vide.

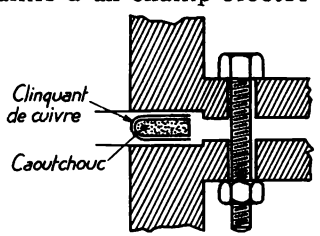


Fig. 30.
Joint métallo-plastique.

On a utilisé également des joints métalliques en serrant un fil de plomb entre les deux pièces, puis en recouvrant le tout de cire molle (fig. 31). C'est un procédé simple, mais efficace seulement pour de grandes pièces, où l'effort exercé par la pression atmosphérique est suffisant pour écraser le fil de plomb, à moins de mettre des boulons de serrage. Pour fermer l'anneau de plomb, il faut évidemment faire une soudure, pour laquelle on doit utiliser un alliage aussi pauvre que possible en étain, de manière que la soudure s'écrase de la même façon que le reste de l'anneau.

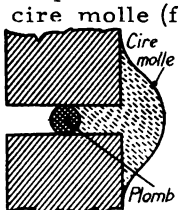


Fig. 31.
Joint de plomb.

On trouve dans le commerce des cires molles obtenues en mélangeant à une matière inerte, graphite ou kaolin, des huiles et graisses minérales de tension de vapeur très faible. Ce sont des produits qui adhèrent très bien aux métaux, à condition que leur surface soit bien sèche. Ils se manipulent très facilement à une température de 15 à 20°. A plus basse température, il est nécessaire de les réchauffer en les pétrissant entre les doigts bien propres. A ce propos, l'usage du sèche-cheveux électrique est susceptible de rendre de nombreux services, comme d'ailleurs chaque fois que l'on veut échauffer une pièce à une température modérée.

L'emploi de ces cires molles est souvent très commode, car elles permettent d'obtenir l'étanchéité avec des pièces s'ajustant mécaniquement d'une façon tout à fait imparfaite. Il faut pourtant remarquer qu'elles ne sont pas à recommander dans les endroits susceptibles de chauffer, car les composants fusibles s'infiltrent vers l'intérieur de l'appareil, alors que le résidu, beaucoup moins plastique, donne lieu à des fuites.

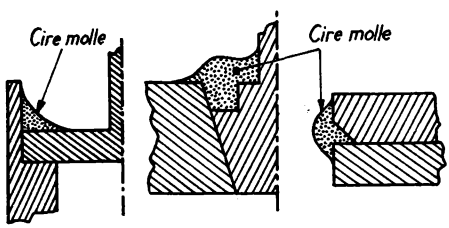


Fig. 32. - Joints de cire molle.

On les applique de préférence dans une gorge pratiquée dans l'une des deux pièces devant s'assembler (fig. 32), en y plaçant et tassant successivement des boulettes qui se trouvent finalement réunies et qu'on lisse en surface avec le pouce, au besoin légèrement mouillé si la cire a tendance à y adhérer. Très souvent, le joint une fois fait sur une pièce amovible, comme une porte, peut être arraché sans autre précaution. En replaçant la pièce, les deux parties du joint de cire viennent se rajuster et il suffit de le tasser et de le lisser avec les doigts pour obtenir rapidement l'étanchéité.

Signalons enfin un emploi particulier : dans les cas où une fuite importante risque de se produire subitement, par exemple, lorsqu'on se sert d'écrans métalliques minces pour fermer les fenêtres d'un tube démontable à rayon X, il est prudent d'avoir à portée de la main une boulette de cire, pour aveugler rapidement la fuite.

Joints élastiques

Lorsqu'on doit réunir deux pièces pouvant avoir un faible déplacement relatif, qu'il s'agisse, soit de pouvoir effectuer un centrage ou régler finement l'orientation de leurs axes, soit de ne pas transmettre de vibrations, on utilise généralement des tuyaux ou membranes thermostatiques, formés de spires obtenues par repoussage et présentant une certaine déformabilité :

- allongement : 5 à 10 %
- compression : 10 à 20 %
- flexion : environ 3° par spire pour un diamètre de 40 mm.

Ces organes sont exécutés en tombac, alliage de cuivre se soudant à l'étain avec une grande facilité (Fig. 33). Il arrive que ces

pièces ne présentent pas une tenue parfaite au vide, de petites fissures se produisant parfois en cours de fabrication. On y remédie en les recouvrant d'une couche de peinture élastique.

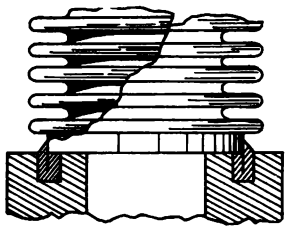


Fig. 33. - Tubes métalliques flexibles.

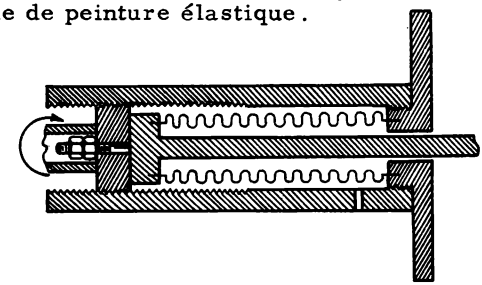


Fig. 34. - Transmission de mouvement longitudinal.

Transmission des mouvements

Les tuyaux flexibles et membranes permettent de résoudre toutes sortes de problèmes, et en particulier celui de la transmission de mouvements à l'intérieur d'une enceinte vidée.

Si on utilise seulement leur élasticité longitudinale, on peut effectuer la transmission de mouvements rectilignes, qui, à l'intérieur de l'enceinte, sont ou non transformés en mouvements de rotation par pignon crémaillère ou par biellettes (fig. 34).

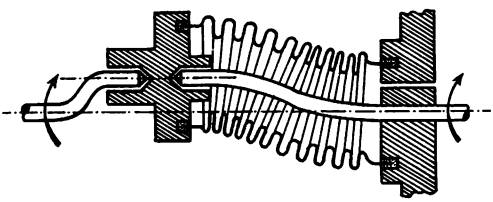


Fig. 35. - Transmission par manivelle.

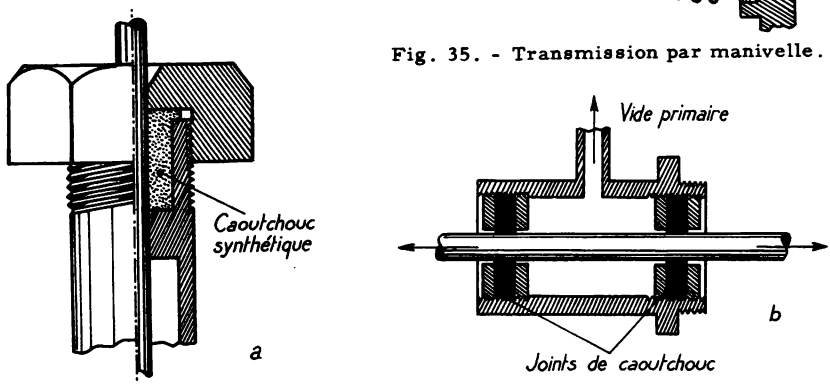


Fig. 36. - Joints de caoutchouc.

Si on utilise leur déformabilité par flexion, on peut transmettre directement des mouvements de rotation par manivelle (fig. 35).

L'utilisation du joint de caoutchouc synthétique, supportant le contact de la graisse, permet également de réaliser très simplement des transmissions de mouvements, soit linéaires, soit circulaires, en constituant un montage identique à celui du presse-étoupe classique (fig. 36).

On peut aussi employer un anneau de caoutchouc synthétique pour faire une garde d'huile sur un rodage conique, graissé ou non, permettant la commande d'une manoeuvre par rotation (fig. 37).

Lorsqu'on veut transmettre des mouvements qui ne sont pas continus, comme pour la manoeuvre d'un cache ou d'un volet, on peut se contenter souvent d'un rodage conique graissé, mais la pression atmosphérique, appliquant les deux pièces l'une sur l'autre, a tendance à chasser la graisse vers l'intérieur; aussi, ce procédé simple ne convient pas lorsqu'il s'agit d'opérations fréquentes et, à plus forte raison, d'un mouvement continu. Dans certains tubes à rayons X à anticathode tournante, on contrebalance l'effet de la pression atmosphérique par un ressort. Il faut seulement faire attention qu'en faisant rentrer l'air dans l'appareil, le rodage ne se décolle pas (fig. 38).

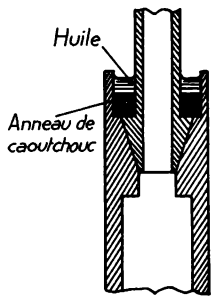


Fig. 37. - Joint à garde d'huile

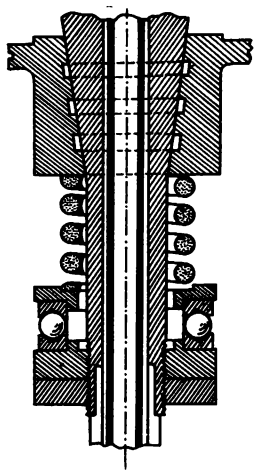


Fig. 38. - Rodage équilibré.

On a récemment signalé un joint rotatif formé simplement d'un anneau d'acier inoxydable portant sur une embase de graphite huilé.

Enfin, il ne faut pas perdre de vue la transmission par champ magnétique : un petit électro-aimant placé à l'intérieur ou à l'extérieur de l'enceinte vidée actionne une pièce de fer doux dont le déplacement peut être utilisé d'une manière quelconque. De même, un champ magnétique tournant peut servir, comme dans la pompe Holweck, à entrainer un rotor solidaire d'un mécanisme convenable. Un tel système est très commodément applicable pour des vitesses de rotation relativement élevées, puisque le champ tournant fourni par le courant alternatif du secteur à 50 périodes donne facilement 1.500 ou 750 tours/min. avec un petit nombre de pôles. Pour obtenir des vitesses plus réduites, on doit multiplier le nombre de pôles, comme dans les moteurs synchrones de pick-up ou d'horloges électriques, mais la construction en devient alors assez délicate et on aura intérêt à chercher dans le commerce des moteurs tout faits pour les adapter au but poursuivi.

Robinets et vannes.

Les appareils de grand volume comportent des organes de communication qui sont de deux sortes : les robinets classiques à boisseau et clé coniques, et les vannes ou portes constituées par des pièces planes qui démasquent ou recouvrent une grande ouverture circulaire.

Les robinets coniques ont l'avantage d'une construction facile et économique; il est recommandé, pour éviter le grippage, de faire le boisseau en laiton et la clé en acier. La voie ne peut guère dépasser quelques centimètres carrés, les dimensions devenant rapidement prohibitives, et cela limite leurs possibilités d'emploi.

Les vannes permettent d'obtenir des sections beaucoup plus grandes. Le principe consiste toujours à obturer une ouverture circulaire au moyen d'une pièce venant serrer un joint, et cette manoeuvre peut se faire de deux façons :

Pour des ouvertures n'excédant pas 5 à 6 cm. de diamètre, on peut se servir d'une clé à vis comme dans les robinets courants de plomberie (fig. 39).

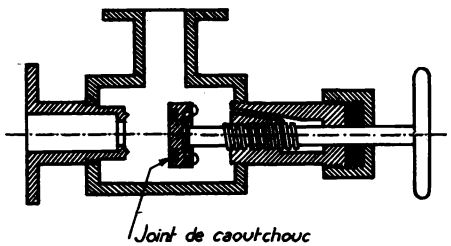


Fig. 39. - Robinet à vide.

Pour des ouvertures plus grandes, où cette disposition entraînerait à des dimensions peu commodes, on décompose généralement en deux temps la manoeuvre de la porte : mouvement de grande vitesse pour l'amener en place, suivi d'un mouvement lent pour le blocage. Ce dernier est très souvent obtenu à l'aide d'une rampe inclinée ou encore hélicoidale, le mouvement de déplacement rapide de la porte pouvant être une translation (fig. 40) ou une rotation (fig. 41).

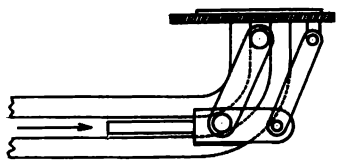


Fig. 40. - Vanne manoeuvrée par translation.

Il est souvent utile, spécialement lorsqu'on utilise des saillies aiguës pour assurer l'étanchéité du joint de caoutchouc, de prévoir un dispositif de décollement, c'est-à-dire un petit levier qui facilite la séparation des deux pièces avant le début du mouvement d'escamotage de la porte.

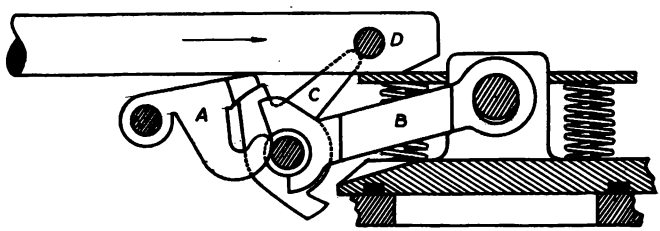


Fig. 41. - Vanne manoeuvrée par rotation.

Dans le dispositif de la figure 41, la porte est appliquée sur son siège au moyen des ressorts comprimés par le bras coulissant. La came A vient bloquer le levier B en fin de course, interdisant tout mouvement de rotation. A l'ouverture, le doigt D vient entrainer la came C de décollement (les cames sont munies de ressorts de rappel non figurés).

De telles portes peuvent avoir des dimensions très grandes, mais il ne faut pas oublier que, si la pression atmosphérique peut être appliquée sur l'une des faces, cela conduit rapidement à des efforts considérables dont il faut tenir compte dans le choix des matériaux. La manoeuvre ne se fait, de préférence, que lorsque les pressions sont à peu près égales de part et d'autre de la porte, ce qui est obtenu par des raccordements reliés au vide primaire.

Dans les robinets sont enfin compris les systèmes à faible débit, utilisés en particulier pour l'admission de petites quantités de gaz dans les appareils accélérateurs d'ions. Le plus courant est le robinet à pointeau, qui peut être une simple vis à pas réduit, dont l'extrémité, taillée en cône, vient obturer un orifice conique. La vis peut être prolongée par une aiguille cylindrique pour avoir un réglage plus fin. La figure 42 montre un modèle comportant un réglage fin et une fermeture par tout ou rien.

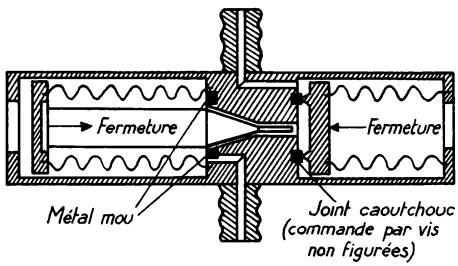


Fig. 42. - Robinet à aiguille.

Un dispositif avantageux consiste à presser au moyen d'une vis une série alternée de rondelles de métal et de caoutchouc, dont on règle la fuite par le serrage.

On peut encore utiliser la différence de dilatation de deux métaux pour obtenir une fuite réglable électriquement, par exemple un tube d'acier inoxydable introduit à force sur une tige de tungstène, que l'on peut changer à l'aide d'une résistance électrique extérieure pour augmenter le débit.

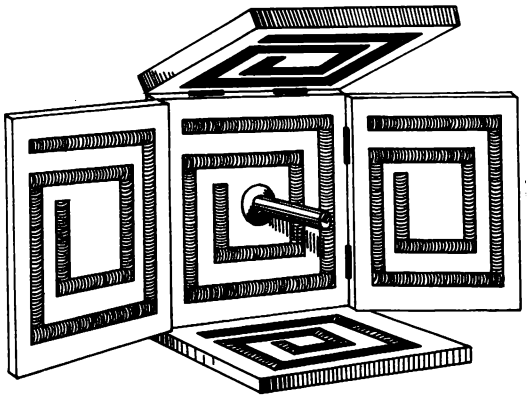
Dégazage des pièces.

Le verre et les métaux en usage dans la technique du vide absorbent en surface des quantités relativement importantes de gaz, qui s'éliminent seulement petit à petit à froid. Aussi est-il souvent utile de dégazer les pièces en les chauffant sous vide.

Pour le verre, c'est une opération courante et facile avec les petites pièces que de les chauffer avec une flamme molle sous vide, mais cela n'est pas sans défaut, en raison de la difficulté de prolonger l'opération au dela de quelques minutes, et c'est impraticable pour les pièces un peu volumineuses de plusieurs litres. Aussi, le mieux est-il de construire un four en installant des résistances électriques sur des panneaux articulés garnis d'amiante; dans ce four seront placées les pièces à traiter qui seront chauffées progressivement à quelques centaines de degrés, soit à une température aussi élevée que possible au-dessous du ramollissement du verre (400 à 500° suivant le verre (fig. 43).

Pour les pièces métalliques, on peut assez souvent les chauffer à l'intérieur d'une cloche à vide en les faisant parcourir par un courant électrique. La haute fréquence offre une solution par-

ticulièrement élégante, utilisée couramment dans l'industrie, mais coûteuse en raison de la nécessité d'un poste d'au moins 1 kilowatt pour des pièces un peu importantes. Pour les petites pièces, et aussi dans le cas où l'on doit opérer sous vide la fusion d'une petite quantité de métal (fig. 44 et 45) la haute fréquence est tout à fait applicable avec les moyens des laboratoires.



Paroi avant mobile non figurée

Fig. 43. - Four à dégazer.

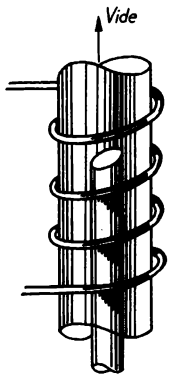


Fig. 44. - Dégazage en H. F. d'une anti-cathode à rayons X.

La température à laquelle on porte les pièces est limitée par la volatilisation du métal, soit approximativement : cuivre et alliages : 500°, nickel, fer, platine, molybdène : 900 à 1.000°, tungstène : 1.800°.

Ce dégazage peut encore s'effectuer dans un four à vide constitué par un tube de silice fermé à un bout ; l'autre extrémité est munie d'un raccord mastiqué qui porte une tubulure pour faire le vide avec un joint de caoutchouc, facile à démonter.

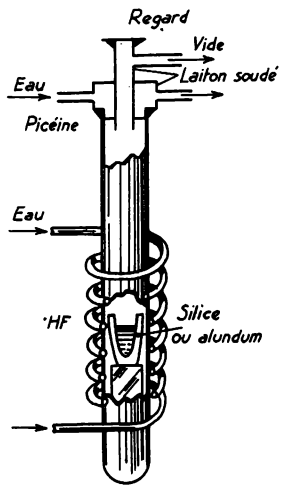


Fig. 45.
Fusion sous vide en H. F.

Un dégazage souvent négligé, mais important, est celui des caoutchoucs devant servir aux joints. Le caoutchouc perd énormément de gaz et, même traité, continue à en éliminer quasi indéfiniment, mais la plus grosse partie du dégazement peut être faite avant montage, si l'on a soin de maintenir le caoutchouc sous vide pendant 48 heures à une température d'une centaine de degrés (après traitement à la soude pour enlever le soufre superficiel). Pour cette opération, on utilisera avantageusement une cloche à vide et un bloc chauffant de réchaud électrique alimenté sous tension réduite comme représenté figure 47, les pièces de caoutchouc étant chauffées directement par contact et retournées en cours d'opération. L'étanchéité est assurée par un joint circulaire de caoutchouc serré au moyen de 6 vis (ne pas oublier de serrer le rebord de la cloche par l'intermédiaire d'une petite cale de caoutchouc).

Les amenées de courant de la plaque chauffante sont faites à travers la plaque et picéinées, et aussi l'évacuation de la cloche.

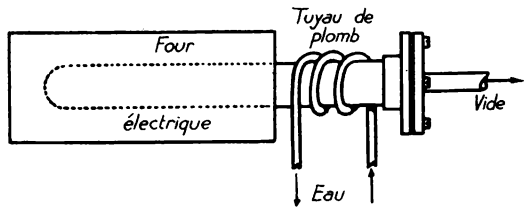


Fig. 46. - Four à vide simple.

Le vide sous lequel doit s'effectuer le dégazage n'est pas nécessairement très élevé, ceci dépend de la destination des pièces. Le plus souvent, on a intérêt à opérer le dégazage aussi complet que possible et, dans ce but, à utiliser un très bon vide. Pour suivre la marche de l'opération, il est commode d'utiliser une jauge d'ionisation (voir page 128), appareil sensible qui travaille à très basse pression, de sorte qu'il est usuel d'utiliser un bloc de pompage comprenant comme dernier étage une pompe à diffusion de vapeur d'huile. Le vide ainsi obtenu est de l'ordre de 10^{-6} mm. de mercure, ce qui permet d'assurer un dégazage excellent, même pour les pièces devant faire partie de montages scellés et pour lesquelles les gaz doivent être éliminés très soigneusement. L'opération dans ce cas, dure de 20 à 50 heures, jusqu'à ce que la pression se stabilise à la valeur minimum que peut fournir l'installation.

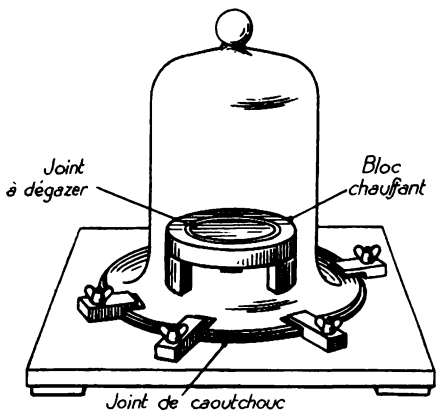


Fig. 47. - Cloche de dégazage.

LA MESURE DES BASSES PRESSIONS

Les basses pressions s'expriment le plus souvent en fraction de millimètre de mercure, l'unité CGS, la barye, correspond à $0,75.10^{-3}$ mm. de mercure, et c'est elle qu'il faut employer de préférence.

Manomètre à mercure.

Les appareils les plus courants pour les pressions relativement élevées, soit au-dessus d'environ 1 mm. de mercure, sont les manomètres à mercure, constitués par un simple tube en U, fermé à une extrémité et relié par l'autre extrémité au récipient

où l'on mesure la pression. Ce sont des appareils très fréquemment utilisés. Pour éliminer toute bulle d'air, seule chose délicate de l'opération, on peut procéder de la manière suivante pour leur fabrication :

On prépare un tube comme indiqué figure 48 (a), en ayant soin de renforcer le verre à l'endroit qui constituera ultérieurement l'extrémité du manomètre (ceci pour rétrécir le passage du mercure et éviter qu'il vienne heurter violemment le fond du tube lors d'une rentrée d'air). On fait ensuite bouillir le mercure sous vide en le chauffant avec précaution pour éviter des soubresauts, puis on scelle sous vide à 1 ou 2 cm. au-dessus de la partie rétrécie. Il reste alors à enlever le morceau de tube en excédent, une fois l'air introduit de nouveau dans la canalisation.

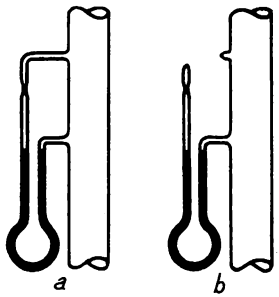


Fig. 48. - Manomètre à mercure.

Un système commode pour les pressions allant jusqu'à 0,1 mm. de mercure environ est une petite jauge de Marc Leod simplifiée (fig. 49-a). L'appareil est, de préférence, monté sur un rodage d'axe horizontal qui permet de le basculer facilement. Le mercure qu'il contient vient alors comprimer le gaz dans le tube et son niveau donne directement la pression après étalonnage. L'autre branche est un manomètre, facile à graduer directement en millimètres.

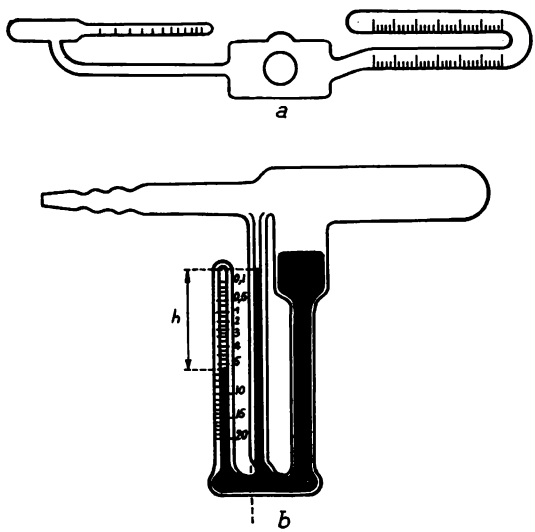


Fig. 49. - Jauges de Mac Leod simplifiées.

Pour s'en servir, on le remplit tout d'abord entièrement de mercure en l'inclinant convenablement pour laisser échapper la bulle d'air de la branche fermée; il est alors prêt à fonctionner après remise en position verticale.

La figure 49-b montre un autre modèle publié par Demontvigniers en 1927, dont le principe et la manoeuvre sont analogues.

On peut, dans certains cas, remplacer le mercure par un liquide moins lourd, permettant d'augmenter beaucoup la sensibilité du manomètre, surtout si l'on incline la branche fermée. C'est ainsi qu'il est possible de construire un manomètre à huile (d = 0,8 à 0,9) de la même façon que pour le mercure, mais avec des tubes plus larges (au moins 10 à 12 mm. de diamètre) pour pouvoir faire bouillir l'huile sans qu'elle forme des chapelets de bulles; ces tubes permettent des mesures d'environ 1/20 mm. de mercure. Il faut seulement intercaler un robinet entre le manomètre et l'installation pour éviter les rentrées d'air sur l'huile, qui en absorbe assez rapidement; il se dégage ensuite dans la branche fermée et fausse complètement les mesures.

Voyant à décharge.

Un tel système est constitué par deux électrodes d'aluminium, distantes d'une dizaine de centimètres (voir soufflage du verre) reliées à une source de tension élevée qui est couramment une bobine à rupteur donnant une étincelle de 2 cm. entre pointes, ou encore un transformateur, par exemple du modèle qui sert aux enseignes lumineuses à néon. Lorsque la pression baisse, à partir de la pression atmosphérique, la décharge commence à apparaitre sous forme de filets très fins, puis donne un filament violacé vers une dizaine de cm. de mercure et s'épanouit ensuite, pour une pression de 2 ou 3 cm., en une lueur à peu près uniforme, qui, lorsque la pression continue à baisser, devient moins intense en se localisant plus près des électrodes. Elle disparait complètement aux environs de 0,001 mm. Hg.

Aux pressions relativement élevées, de l'ordre du centimètre de mercure, le courant qui traverse le tube à décharge est grand et un fonctionnement continu sous la pleine tension peut échauffer dangereusement les électrodes. Aussi, certains constructeurs se servent-ils d'un transformateur à fuites, donnant une chute de tension importante en charge. Lorsqu'on se sert d'un transformateur ordinaire, il est indiqué de monter en série avec son primaire un rhéostat permettant de réduire la tension tant que le vide n'est pas bon.

Le voyant permet donc une estimation très grossière de la pression par l'aspect de la décharge; il a surtout un grand intérêt pour la vérification rapide de l'étanchéité d'une installation et la recherche des fuites (voir pages 110 et 111).

Un perfectionnement a été apporté à ce dispositif par l'adjonction d'un aimant (jauge de Penning) : le champ magnétique, de quelques centaines d'oersteds, produit une courbure des électrons qui a pour effet d'augmenter considérablement leur parcours entre les électrodes, et, par suite, le nombre d'ions produits. Il s'ensuit que la décharge subsiste encore pour des pressions notablement inférieures. Le courant varie comme la pression du gaz et peut servir à la mesurer (fig. 50).

On se sert d'une source de tension continue et d'un microampèremètre ou d'une lampe à décharge au néon à électrodes

très dissymètriques, la longueur de la colonne lumineuse étant sensiblement proportionnelle au courant. On peut ainsi étalonner l'appareil directement en pression, cet étalonnage étant fonction de la nature du gaz dans lequel se produit la décharge. Le domaine d'utilisation de ce système est situé entre 10^{-4} et 10^{-3} mm. de mercure, ainsi que l'indique la courbe de la figure 50. Le remplacement de la lampe à néon par un microampèremètre à plusieurs sensibilités permet de faire des mesures jusqu'à 10^{-5}mm.

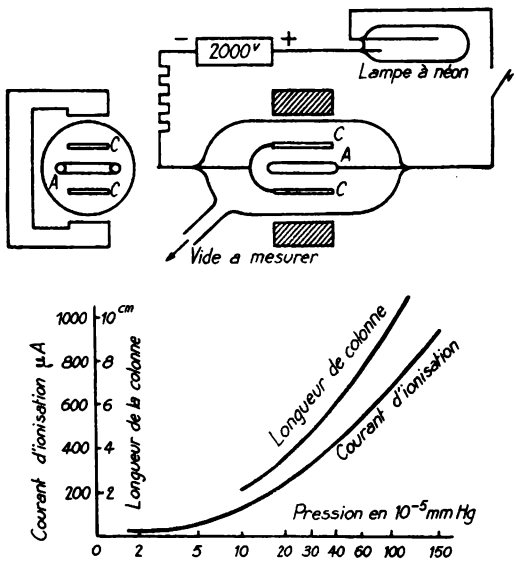


Fig. 50. - Vacumètre à décharge.

Une caractéristique de cet appareil est l'absence de toute pièce à température élevée, à l'inverse de la jauge d'ionisation (voir page 128) comportant un filament susceptible de dégazer beaucoup par chauffage et nécessitant, de ce fait, un dégazage avant d'effectuer une mesure. Cela autorise également des rentrées d'air sur l'appareil en fonctionnement.

Jauge de Mac Leod.

Le principe de cet appareil est bien connu et repose sur la loi de Mariotte. L'ampoule dans laquelle s'effectue la compression du gaz a un volume qui varie de 50 à 200 cm^3, généralement 100 cm^3, et le tube capillaire qui la surmonte a un diamètre compris entre 5 mm. et 0 mm. 5. Les pressions mesurables avec cet appareil s'échelonnent suivant les dimensions entre quelques millimètres et 10^{-4} mm. de mercure. Pour les pressions de 10^{-4} à 10^{-5} mm. les indications sont plutôt qualitatives et, plus loin, la tension de vapeur du mercure devient trop importante pour permettre une mesure qui ait un sens. Le dispositif original utilisant une fiole de mercure reliée par un tube de caoutchouc à la jauge proprement dite présente des inconvénients sérieux, en particu-

lier en raison des fuites très fréquentes avec le caoutchouc; lorsqu'une bulle gazeuse vient à se dégager au cours d'une mesure, celle-ci est complètement faussée si on n'a pas intercalé un purgeur (fig. 51). De plus, le soufre du caoutchouc se libère petit à petit et attaque le mercure en donnant une crasse qui se colle sur le verre. On réduit évidemment cet inconvénient en traitant le caoutchouc comme plus haut (page 114). D'autre part, la manoeuvre de la fiole de mercure n'est pas sans danger et le montage est, au total, très encombrant. Il est donc préférable d'installer un dispositif comme ceux de la figure 52, dans lesquels la manoeuvre du mercure se fait au moyen de robinets; cette dernière disposition présente encore l'avantage de permettre de laisser le mercure en permanence sous vide, ce qui est évidemment

Fig. 51. - Purgeur à mercure.

une condition favorable. Un inconvénient est peut-être que la manoeuvre des différents robinets nécessite une certaine attention, puisque le mercure peut monter dans la canalisation par suite d'une erreur, mais ceci est assez facile à éviter si l'on prend toujours soin de commencer à tourner les robinets très lentement, en s'assurant avant de poursuivre l'ouverture que le déplacement du mercure se fait bien dans le bon sens.

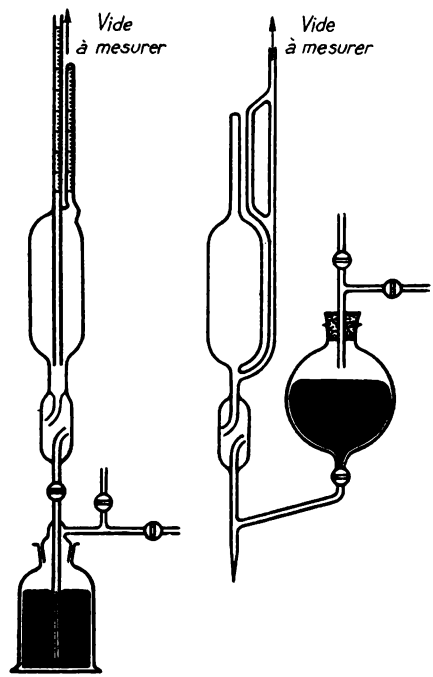


Fig. 52. - Jauges sans caoutchouc.

Au moment de l'installation et du remplissage d'une jauge neuve, il faut prendre quelques précautions pour être sûr que le verre et le mercure sont tout à fait propres. Pour cela, on laissera la jauge en communication avec un desséchant pendant plusieurs heures, après l'avoir chauffée progressivement avec une flamme molle de gaz, en la maintenant sous vide. On y introduira ensuite le mercure soigneusement purifié et de préférence bouilli sous vide.

La mesure de la pression avec une jauge de Mac Leod se fait généralement en se fixant le niveau final du mercure dans le capillaire de la chambre de compression, donc le taux de compres-

sion. Ce capillaire est très souvent gradué sur toute sa longueur, ce qui permet de bénéficier d'un grand nombre de taux de compression. Le tube dans lequel se fait l'ascension du mercure est gradué en millimètres; il doit être le plus près possible de l'autre pour réduire les erreurs de parallaxe dans la lecture de la pression en fin de compression. Certains types de jauges de Mac Leod comportent des tubes de diamètres différents, donnant par conséquent des sensibilités variées, par exemple quatre, permettant de faire des mesures entre 10^{-5}mm. et 4 mm. de mercure (fig. 53). En réalité, il est rare qu'on ait besoin d'une si grande marge et l'on peut, le plus souvent, se contenter de deux diamètres de tubes, en ayant naturellement toujours soin, pour éviter les corrections capillaires, de lire la hauteur du mercure dans un tube ayant le même diamètre que celui ou est faite la compression.

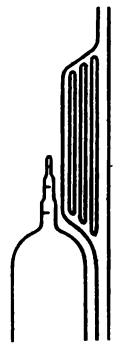


Fig. 53. - Jauge à plusieurs sensibilités.

Rappelons que la jauge de Mac Leod risque de donner des indications très fausses si l'enceinte contient une vapeur facilement condensable, en particulier l'humidité. Pour les pressions assez basses, le taux de compression est en effet suffisamment élevé pour qu'on ait condensation au moins partielle, en tous cas écart à la loi de Mariotte, et il s'ajoute encore à cela des questions de tension superficielle qui augmentent les causes d'erreur.

Ce sont des appareils d'un emploi souvent commode, dont les inconvénients sont essentiellement, d'une part, la présence de mercure, dont la vapeur peut être une gêne, et d'autre part, leur fragilité, puiqu'ils sont formés de pièces de verre longues et lourdement chargées. Les vibrations de machines en particulier, leur sont funestes. Il faut encore ajouter à cela qu'une mesure est relativement longue et qu'il est en tous cas impossible de faire la lecture de la pression de façon continue.

Jauge de Pirani.

La jauge de Pirani utilise la perte de chaleur d'un fil chaud dans un gaz. Cette perte de chaleur est une fonction croissante de la pression du gaz, à condition que les pertes par les supports soient négligeables. La température du fil est mesurée par sa résistance ou par effet thermo-électrique; elle dépend du courant qui la traverse et aussi de la température de l'enceinte qui la renferme.

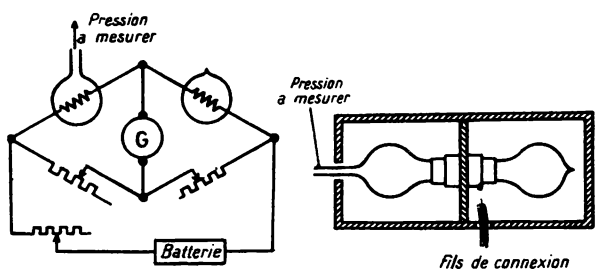


Fig. 54. - Jauge de Pirani.

Pour s'affranchir de cette variable, on peut se servir de deux lampes d'éclairage ordinaires, montées identiquement dans une même enceinte, l'une étant vidée complètement et l'autre contenant le gaz dont on mesure la pression. Elles sont parcourues par le même courant et leurs résistances sont comparées à l'aide d'un pont de Wheatstone (fig. 54).

Un montage plus compliqué est utilisé dans un appareil du commerce (barymètre). On alimente le fil par un pont constitué par des lampes à filament de tungstène et à filament de charbon dont les coefficients thermiques de variation de résistivité sont de signe contraire; le courant est ainsi pratiquement indépendant des variations de tension du secteur (fig. 55). D'autre part, le fil est constitué par une série d'éléments de constantan et de fer formant des couples thermoélectriques, dont la soudure froide est au contact de l'enveloppe, masse de cuivre rouge de plusieurs centaines de grammes, la soudure chaude étant au milieu. Les couples sont montés en série et la force électromotrice totale est mesurée par un appareil à cadre mobile pouvant être gradué directement en baryes.

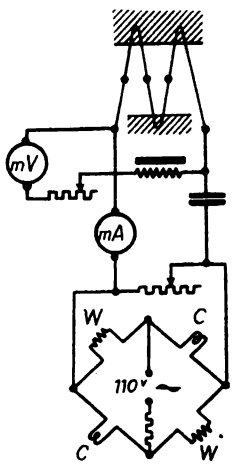


Fig. 55. - Schéma du barymètre.

La sensibilité de la jauge de Pirani décroit très rapidement avec la pression, et les limites d'emploi se situent entre 10^{-3} et 10^{-4} mm. de mercure (env. 100 à 0,1 baryes), c'est-à-dire approximativement les mêmes que pour la jauge de Mac Leod, généralement plus sensible, mais certainement beaucoup moins commode. La meilleure sensibilité est obtenue vers 10^{-2} mm.

Puisqu'il s'agit, en somme, d'états d'équilibre thermique, il faut, avant de faire la mesure, attendre que l'indication se fixe; c'est un inconvénient très léger, puisqu'en fonctionnement continu, les variations de pression sont, en général, assez lentes pour que le système soit toujours en équilibre; signalons, pour terminer, un avantage parfois intéressant, d'ailleurs commun à tous les appareils électriques, de permettre de faire les mesures à distance.

Jauge d'ionisation.

C'est une lampe à trois électrodes fonctionnant d'une façon particulière. La grille est soumise à une tension électrique positive par rapport au filament. Les électrons arrachés de celui-ci ionisent les molécules qu'ils rencontrent en se dirigeant vers la grille, les ions positifs produits poursuivent leur chemin et sont recueillis par la plaque, portée à un potentiel négatif. Pour un courant grille-filament donné, le courant plaque est seulement fonction de la pression et de la nature du gaz (fig. 56).

Il est indispensable, avant de faire une mesure, d'opérer sous vide un dégazage soigneux des électrodes; on réunit à cet effet grille et plaque et on fait circuler le courant d'électrons maximum que peut fournir le filament (amenant les deux autres électrodes au rou-

ge sombre) pendant un temps de 10 à 20 secondes seulement pour ménager le filament.

Il est souvent avantageux, pour avoir un contrôle permanent du degré de vide, de laisser la jauge fonctionner d'une manière continue. C'est évidemment catastrophique en cas de rentrée d'air inopinée, mais normalement, cela assure que le filament n'absorbe pas de gaz.

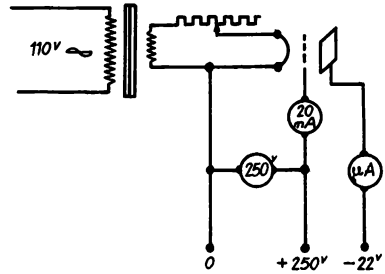


Fig. 56. - Schéma de principe de la jauge d'ionisation.

L'industrie fournit des jauges d'ionisation métalliques démontables équipées avec un coffret de commande permettant de réaliser immédiatement les connexions nécessaires. Les dimensions en étant constantes, il est possible d'avoir un étalonnage valable pour tous les appareils, le courant d'électrons étant fixé à une valeur déterminée (20 mA par exemple).

On peut utiliser simplement une lampe triode ordinaire, en veillant seulement à ce que la plaque soit très bien isolée, soit qu'elle soit reliée à une corne (lampe triode émettrice H.F.), soit qu'on enlève le culot de la lampe. Le dégazage sera effectué par exemple, en appliquant une tension alternative de quelques centaines de volts. Pour la mesure, on peut encore se servir d'un transformateur, en utilisant les alternances rendant la grille positive, le potentiel de plaque négatif étant obtenu par la chute ohmique de tension aux bornes d'une résistance traversée par le courant grille (fig. 57).

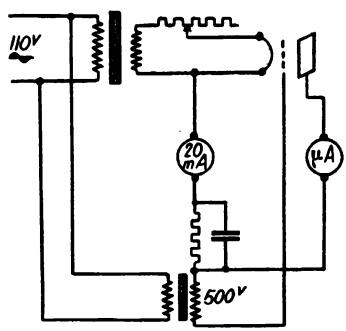


Fig. 57. - Jauge d'ionisation alimentée en courant alternatif.

Le domaine d'utilisation de la jauge d'ionisation est de 1 à 10^{-6} et même 10^{-7} baryes (env. 10^{-3} à 10^{-10} mm. de mercure). Pour les mesures courantes, on a souvent besoin de contrôler seulement la constance de la pression, ou des variations relatives, et l'étalonnage a une importance secondaire. Pour les mesures absolues, il faut, au contraire, se soucier de la nature du gaz qui remplit l'appareil et il est utile dans ce cas de faire un étalonnage spécial. A partir d'une pression de l'ordre de 10^{-4} mm. on a:

$$p\,(\text{mm.}) = K.I.\,(\mu A)$$

A titre d'indication, nous donnons quelques valeurs numériques de K pour une jauge déterminée, avec des gaz différents.

air	mercure	vapeur d'huile
$0,3.\ 10^{-5}$	$0,11.\ 10^{-5}$	$0,03.\ 10^{-5}$

Des appareils de principe très voisins utilisent comme source d'ionisation un produit radioactif.

Manomètre absolu de Knudsen.

Dans cet appareil, on crée, entre une paroi fixe et une feuille métallique légère, une différence de température de quelques degrés. L'impulsion donnée par les molécules à la feuille fait dévier celle-ci proportionnellement à la pression, le coefficient de proportionnalité étant indépendant de la nature du gaz.

Un modèle simple est celui de Holweck (fig. 58), facile à construire au laboratoire. Il utilise une feuille d'aluminium pour électroscope (quelques microns d'épaisseur, dimensions 5 x 100 mm.) fixée dans l'axe d'un demi-cylindre de laiton. On envoie, dans la double enveloppe, de l'eau chauffée par passage dans un petit four électrique, et la feuille se déplace vers le laiton. Pour faire la mesure, on note la température de l'eau, puis on allume le four. La température de l'eau s'élevant de quelques degrés, la déviation de la feuille, proportionnelle à la différence de température (tant qu'elle est petite) et à la pression, est notée et ramenée à 1°. Chaque mesure dure environ 30 secondes. L'étalonnage est fait avec une bonne jauge de Mac Leod, en prenant soin d'attendre assez longtemps pour que toute vapeur soit éliminée, un piège à air liquide étant évidemment interposé entre la jauge et le manomètre.

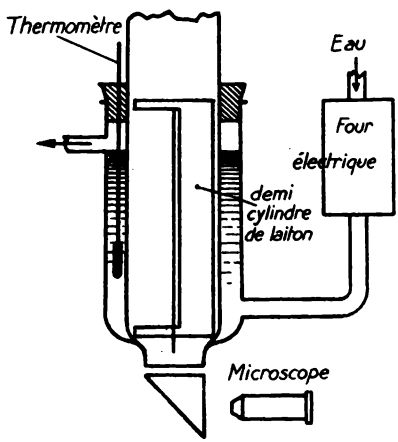


Fig. 58. - Manomètre absolu de Holweck.

La sensibilité est fonction du grossissement du microscope de visée, mais elle est surtout limitée par les vibrations mécaniques, auxquelles cet appareil est extrêmement sensible. On peut couramment mesurer 1/10 à 1/100 barye (env. 10^{-3} à 10^{-4} mm. de Hg).

Il existe d'autres modèles plus perfectionnés, mais dont la construction est relativement délicate.

Manomètre à fibre de silice vibrante.

Ce manomètre, rarement employé, utilise l'amortissement des oscillations d'une fibre de silice, la mesure consistant en celle du temps t nécessaire pour réduire de moitié leur amplitude. La fibre a, par exemple, 50 μ de diamètre et 50 mm. de longueur et elle est fixée à l'extrémité d'un tube de verre de 20 à 30 mm. de diamètre. La pression p est reliée au temps t par la relation : $p\sqrt{M} = \frac{a}{t} - b$ (M = poids moléculaire du gaz), les deux constantes a et b sont déterminées par deux mesures, l'une à très

basse pression et l'autre à une pression connue. Ce dispositif convient pour des pressions de l'ordre de 2.10^{-2} à 5.10^{-5} mm.

Pratiquement, l'impulsion peut être donnée à la fibre de silice à l'aide d'un petit tube de verre tournant dans un logement convenable et contenant une palette de fer actionnée de l'extérieur par un électro-aimant (fig. 59). L'image de la fibre est projetée sur une échelle à l'aide d'un système optique simple pour examiner son mouvement.

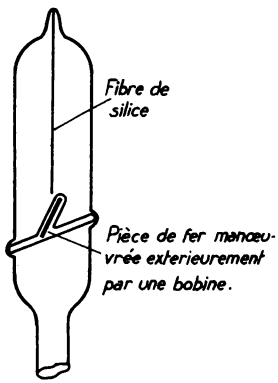


Fig. 59. - Manomètre à fibre de silice.

Ce manomètre peut être intéressant pour la vérification de la bonne tenue d'appareils scellés, et aussi dans le cas où l'on doit effectuer des mesures de pression dans des atmosphères agressives (halogènes, acides divers), ce qui n'est certes pas fréquent dans le domaine de pression où fonctionne cet appareil. Les chimistes ont à mesurer des pressions généralement plus élevées, et l'emploi de manomètres ordinaires à mercure est possible dans ce cas d'atmosphère chimiquement très active, en recouvrant le mercure d'une couche d'huile ou d'un autre liquide convenable.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages fondamentaux

DUNOYER : La technique du Vide, Presses Universitaires de France 1924.

DUSHMAN : High Vacuum, G.E.C. Review, New-York 1922

STRONG : Procedures in experimental Physics, New-York 1935

YARWOOD : High Vacuum Technique, Chapmann and Hall, London, 1945.

Périodiques

Journal de Physique, Paris.

Le Vide, Paris.

Review of Scientific Instruments, New-York.

QUATRIÈME CHAPITRE

LA RÉALISATION ET LA MESURE DES HAUTES TEMPÉRATURES

par

G. RIBAUD

Membre de l'Institut
Professeur honoraire à la Faculté des Sciences de Paris
(Chaire des hautes températures)

et

A. MOUTET

Ingénieur de Recherches à l'ONERA

LA RÉALISATION ET LA MESURE DES HAUTES TEMPÉRATURES

PREMIÈRE PARTIE

GÉNÉRALITÉS 137

FOURS ÉLECTRIQUES 141
Divers types de fours électriques 141
Fours électriques à résistance 144
Fours à tiges chauffantes 152
Résistors de formes variés 156
Fours à arc 161
Fours à induction 162
Fours à rayons cathodiques 170
Fours à concentration de rayonnement 171

FOURS A FLAMMES 172
Fours à gaz 176
Chalumeau à hydrogène atomique 183

MESURE DES TEMPÉRATURES ÉLEVÉES 185
Couples thermoélectriques 185

PYROMETRE OPTIQUE 193
Pyromètre à disparition de filament 193
Pyromètre à radiation totale 197
Récepteurs photoélectriques 198
Mesure de la température des flammes et des gaz chauds 198

ENREGISTREMENT ET RÉGULATION 199
Régulation des températures élevées 201

DEUXIÈME PARTIE

Introduction 207

NATURE DES DIVERSES ÉSPÈCES DE FLAMMES 207

PROCÉDÉS DE MESURES NÉCÉSSITANT L'IMMERSION DANS LE FLUIDE D'INSTRUMENTS DIVERS 208

MÉTHODES OPTIQUES 211
Température de brillance et température vraie 211

Méthode des deux couleurs 212
Méthode de mesure par inversion d'une raie spectrale 213

PYROMETRIE RAPIDE D'ABSORPTION ET D'ÉMISSION 214
Procédés d'enregistrements 215
Précision des mesures 218
Conditions à remplir par le système optique 218
Enregistrement périodique des valeurs Y_1 , Y_2 et Y_3 219
Enregistrement simultané des valeurs Y_2 et Y_3 223
Enregistrement continu de la température 226
Réalisation pratique et utilisation 228

CONCLUSION 229

QUATRIÈME CHAPITRE

PREMIÈRE PARTIE

LA RÉALISATION DES HAUTES TEMPÉRATURES

GÉNÉRALITÉS

La réalisation des hautes températures a pris une place importante dans la plupart des laboratoires de recherches. Le chimiste organicien lui-même n'échappe pas à la nécessité d'obtenir une température élevée dans le tube de combustion organique qui lui sert à fixer la composition chimique des corps obtenus au laboratoire ; les opérations de cracking et de pyrogénation relèvent toutes de la technique des hautes températures. En chimie minérale, il n'est guère de laboratoire qui ne soit appelé journellement à calciner, fondre ou dissocier des produits variés ; l'analyse thermique prend une importance de plus en plus grande. Les laboratoires de physique comme ceux de chimie réclament, dans ces réalisations de températures élevées, une uniformité et une précision chaque jour croissantes. Le géologue, le cristallographe, eux-mêmes, sont amenés et seront amenés de plus en plus à faire des emprunts aux techniques des hautes températures, les uns pour l'étude de leurs roches, les autres pour la synthèse de cristaux par voie ignée.

On peut évidemment admirer un savant comme Sainte Claire Deville, qui, avec un simple fourneau à charbon de bois, a découvert le phénomène de dissociation et en a étudié les lois, mais on doit également reconnaître que chaque apparition d'un mode nouveau de chauffage a toujours conduit à des découvertes ; l'usage de l'arc électrique a permis à Moissan d'obtenir un grand nombre de corps inconnus dont certains, comme le carbure de silicium et le carbure de calcium, se sont fait une place honorable dans la littérature chimique.

L'obtention de corps réfractaires susceptibles de supporter des températures de plus en plus élevées a été également la source de progrès scientifiques et techniques. Le tungstène, dernier venu dans la liste des métaux usuels, est à la base de perfectionnements fondamentaux dans la technique de l'éclairage, dans celle des transmissions radioélectriques, de la production des rayons X, on peut dire également que la métallurgie est limitée dans ses progrès par l'obtention, à l'échelle industrielle, de corps réfrac-

taires permettant de dépasser la température limite actuelle de 1.800°.

Notre but, dans le présent chapitre, sera de donner aux chercheurs comme aux laboratoires industriels, les moyens pratiques de réalisation de températures élevées. Bien entendu, nous serons amenés à laisser de côté les appareils adaptés à des buts très spéciaux et à décrire uniquement ceux d'usage courant ; dans leur description, nous aurons soin d'éviter tous détails superflus, en nous limitant aux principes généraux qui président à leur réalisation. Nous avons, toutefois, jugé indispensable de donner au début de ce chapitre quelques considérations générales sur la transmission de la chaleur et sur les précautions à prendre si l'on veut éviter de fatiguer inutilement les réfractaires ou les résistances de chauffe utilisés dans la construction des divers types de fours.

Rappel de données sur la transmission de la chaleur

Chaque fois qu'on le peut, on est amené à produire la chaleur au sein même de la substance à chauffer ; on y trouve, en plus d'un gain de rendement thermique, la possibilité d'atteindre aisément la température limite que peut supporter la substance à traiter ; si, par exemple, l'on veut fondre un oxyde très réfractaire (magnésie, zircone, thorine), un moyen simple consiste à faire éclater l'arc dans la poudre de cet oxyde, disposée simplement dans une grossière cuvette faite d'un échafaudage de briques (fig. 15). Bien entendu, la partie centrale de la poudre sera seule fondue, la partie extérieure servant de calorifuge.

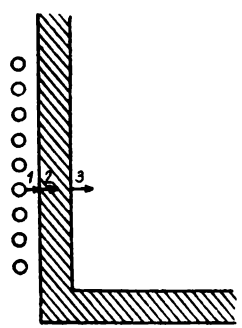


Fig. 1.- Schéma de transmission de la chaleur dans un four

1. Transmission du résistor à l'enveloppe
2. Conduction à travers l'enveloppe.
3. Rayonnement de l'enveloppe vers l'enceinte à chauffer.

Le chauffage par courants induits de haute fréquence, qui développe la chaleur dans la substance conductrice elle-même, permet d'utiliser une enveloppe relativement peu réfractaire, alors que le chauffage par l'extérieur nécessiterait l'emploi d'une enveloppe nettement plus réfractaire que la substance à chauffer. Dans la pratique actuelle de la fusion du platine, telle qu'elle a été précisée par Sainte Claire Deville, le chalumeau oxhydrique est dirigé sur le métal à fondre, il lui transmet directement sa chaleur ; quant à l'enveloppe, ses parties extérieures restant relativement froides, on n'a pas à craindre de fuites de métal, même dans le cas d'une légère surchauffe au delà de la fusion. Dans de telles opérations, courantes en métallurgie, on peut même se borner à constituer l'enveloppe par un garnissage réfractaire d'épaisseur relativement faible reposant sur un support moins réfractaire apportant à l'ensemble la rigidité mécanique indispensable.

Mais évidemment, dans de nombreux cas pratiques, il est indispensable d'isoler la substance à chauffer du dispositif de chauffage ; la transmission de la chaleur doit alors s'effectuer à

travers une enveloppe ; elle amène nécessairement un excès de température entre les deux faces de l'enveloppe, excès dont nous allons fixer les ordres de grandeur ; nous en profiterons pour préciser les écarts de température à envisager entre les diverses parties d'un four suivant la puissance que l'on désire y dissiper.

En pratique, on peut considérer que les échanges de chaleur entre les diverses parties d'un four qui ne sont pas en contact matériel s'effectuent uniquement par rayonnement : la convection joue un rôle très faible.

Envisageons d'abord le cas où la paroi chauffante à température absolue T_1 rayonne vers la substance à maintenir à température T ; la puissance rayonnée en watts, par cm^2 de la surface S de la paroi, est donnée par la formule :

$$\frac{P}{S} = 5{,}6 \left[\left(\frac{T_1}{1000} \right)^4 - \left(\frac{T}{1000} \right)^4 \right]$$

(T_1 et T, températures absolues).

Pour T_1 = 1.100°C=1.400°K, T=1.000°C=1.300°K, $\frac{P}{S}$=5 watts/cm^2

(Ceci suppose les pouvoirs émissifs des deux parois égaux à l'unité pour un calcul plus rigoureux, on devra tenir compte des valeurs données dans le tableau IV.)

Dans un four où T_1 resterait égale à 1.100°C, mais T serait abaissée à 800°C = 1.100°K, le taux de puissance P deviendrait égal à 12 watts/cm^2 .

Une baguette de carborundum portée à 1.450°C (1.750°K), placée dans un four à 1.400°C (1.700°K), pourra y rayonner par cm^2 de sa surface propre, une puissance : $P = 5{,}7 [(1{,}75)^4 - (1{,}70)^4] =$ 5 watts/cm^2 : dans le même four à 1.400°C, une baguette de graphite susceptible d'être portée à 2.000°C rayonnerait une puissance nettement plus élevée ; environ 100 watts/cm^2 .

Les chiffres précédents montrent en particulier que la puissance que peut dissiper un corps de chauffe porté à une température donnée est d'autant plus grande que l'enceinte dans laquelle il rayonne est à température plus basse ; toutes choses égales, la puissance dissipée est proportionnelle à la surface du corps de chauffe, de sorte que l'on a intérêt, dans les cas limites, à accroitre au maximum cette surface ; mais un four électrique comportant un petit nombre de tours de fil fin peu rapprochés ne permettra pas la réalisation de températures très élevées pendant un temps prolongé.

Envisageons maintenant l'influence d'une paroi réfractaire interposée entre le corps de chauffe et la substance à chauffer (fig. 1) ; ici, la chaleur doit se transmettre par rayonnement du corps de chauffe à la surface extérieure de la paroi, puis par conductibilité à travers la paroi, et enfin par rayonnement depuis la face interne de la paroi jusqu'à la substance. Si nous reprenons l'exemple étudié plus haut d'un four à pertes à 1.000°C avec un taux de puissance de 5 watts/cm^2 , et si la paroi interposée a une épaisseur de 3mm, le calcul montre que les températures res-

pectives des parois 3,2 et 1 doivent être respectivement 1.350° , 1.250° et 1.100°C ; la présence de la paroi interposée amène à surchauffer la résistance de chauffe de 250° et la chute de température à travers le réfractaire est d'environ 150°. (Dans ce calcul, nous admettons que la paroi interposée a un pouvoir émissif égal à 1 ; les oxydes refractaires habituels ont un pouvoir émissif nettement plus faible, ce qui conduirait à un écart encore plus élevé.)

De tels chiffres montrent la nécessité d'éviter toute interposition de paroi chaque fois que l'on désire atteindre les limites des températures que peut fournir sans altération une résistance de chauffe donnée ; on disposera cette résistance sur la paroi intérieure de l'enceinte. Si, pour des raisons spéciales, on est amené à bobiner cette résistance sur la face extérieure d'un tube rainé ou non, on choisira ce tube d'épaisseur aussi faible que possible et de grande conductibilité calorifique ; on facilitera le passage de la chaleur entre la résistance et le tube au moyen d'un ciment réfractaire qui produira un contact matériel entre ces deux corps. La plupart des remarques précédentes s'appliquent bien entendu au chauffage par flammes.

Corps réfractaires pour températures élevées

Nous aurons l'occasion de donner plus loin des indications sur les corps conducteurs de l'électricité, susceptibles de servir de résistances de chauffe dans les fours électriques. Pour la constitution des parois intérieures des fours ou des pièces spéciales servant de support aux résistances de chauffe, on est amené à utiliser des corps réfractaires agglomérés ou fondus (oxydes, carbone), capables de supporter des températures élevées. Nous avons groupé leurs caractéristiques essentielles dans le tableau 1.

Les divers chiffres contenus dans ce tableau ne doivent être considérés que comme approximatifs ; toutes les constantes physiques des diverses substances, et en particulier leur température limite d'utilisation, dépendent beaucoup du degré de pureté ; leur degré de porosité, leur résistance aux variations brusques de température, leur retrait à haute température, dépendent essentiellement du degré de cuisson.

En règle générale, pour obtenir des objets réfractaires ne prenant pas de retrait, imperméables aux gaz, de faible réactivité vis-à-vis des agents chimiques, il est indispensable de fondre d'abord la matière première, de la broyer et de la pulvériser; une agglomération de la poudre avec une quantité très faible de liant approprié suivie d'une cuisson jusqu'au début de ramollissement fournit des objets de haute qualité, en partie vitrifiés, mais malheureusement très sensibles aux variations brusques de température. De façon générale, les réfractaires poreux sont moins sensibles au choc thermique que ceux ayant subi un début de vitrification ; ils sont également moins conducteurs de la chaleur. Dans le cas des oxydes réfractaires : magnésie, zircone, thorine le liant est obtenu par addition d'une petite quantité d'une solution du chlorure ou nitrate du métal.

Produits calorifuges utilisés dans la construction des fours

Les produits calorifuges utilisés pour diminuer les déperditions calorifiques par les parois des fours peuvent être solides (corps poreux de faible densité) ou pulvérulents ; en règle générale, les premiers seront d'autant plus isolants qu'ils seront moins agglomérés, c'est-à-dire auront une masse spécifique plus faible, les seconds seront d'autant meilleurs isolants qu'ils seront réduits en poudre plus fine.

La plupart des produits calorifuges agglomérés ou cellulaires que l'on trouve dans le commerce (briques d'infusoires, agglomérés de carbonate de magnésie, verre cellulaire) ne résistent pas à des températures très élevées et doivent être utilisés uniquement dans la partie extérieure de la paroi des fours ; il en est de même pour les produits pulvérulents minéraux les plus courants (terre d'infusoires, bourre d'amiante, bourre et soie de verre) ; les produits végétaux ne peuvent être utilisés qu'exceptionnellement (laine, coton, liège en grains), leur température d'utilisation ne dépassant guére 100°. Mais bien entendu, on peut utiliser dans des cas spéciaux, à des températures relativement élevées, des poudres fines d'oxydes très refractaires (alumine, magnésie, zircone) et également, quand la présence du carbone n'est pas gênante, du noir de fumée dont la conductibilité est particulièrement faible et la température d'utilisation particulièrement élevée (supérieure à 3.000°). On trouve dans le commerce du charbon poreux aggloméré (filtres) qui constitue un excellent calorifuge solide aux températures très élevées.

Nous avons rassemblé dans le tableau II les caractéristiques essentielles des calorifuges utilisables dans la pratique du laboratoire avec l'indication de leurs températures d'emploi.

FOURS ÉLECTRIQUES

DIVERS TYPES DE FOURS ÉLECTRIQUES

Les schémas de la figure 2 donnent une idée des divers types de fours électriques pour températures élevées. Le premier (a) utilise, pour produire la chaleur, une résistance parcourue par un courant électrique ; cette résistance peut affecter la forme d'un fil, d'un ruban, d'une ou plusieurs tiges, d'un cylindre creux, etc. Dans de nombreux cas, cette résistance, portée à haute température, rayonne directement vers la substance à chauffer, circonstance favorable pour une bonne transmission de la chaleur.

Parfois, la résistance de chauffe (tige par exemple) est noyée au sein même de la substance à chauffer ; fusion d'un oxyde réfractaire par exemple. Si l'on veut que la substance soit isolée de l'atmosphère du four, on sera évidemment amené à disposer une cloison réfractaire dont nous avons précisé plus haut les inconvénients. Dans ce premier type de four, on remarquera la nécessité, d'amener le courant de chauffe dans la résistance ; une telle sujetion, peut gêner dans le cas de fils dont la résistance électrique est très élevée, se traduit au contraire par des diffi-

TABLEAU 1.- SUBSTANCES SOLIDES RÉFRACTAIRES POUR HAUTES TEMPÉRATURES

	Température de fusion	Température limite d'utilisation	Conductibilité calorifique watts/ cm. degré(1)	Pouvoir émissif total	
Silice fondue	1.700		0,01		Se dévitrifie assez rapidement si elle est soumise à des variations répétées de température au dessus de 1.100°.
Carborundum.....		1.600	0,06		
Alumine	2.050	1.900	0,02	0,15	
Produits silico-alumineux.					
Sillimanite (SiO_2, Al_2O_3).		1.750			Certains produits sont imperméables aux gaz jusqu'à 1.500°.
Chaux	2.570			0,13	
Magnésie	2.800	2.400	0,03	0,25	
Zircone	2.900	2.500		0,45	
Thorine	3.000	2.700		0,23	

(1) Pour avoir la conductibilité calorifique en cal/cm. sec., diviser les nombres ci-dessus par 4, 18. A ces nombres,on ne doit attacher qu'une valeur relative ; la conductibilité thermique croit en effet beaucoup avec le degré de cuisson ; elle est 3 ou 4 fois plus grande pour les produits vitrifiés que pour les mêmes produits agglomérés.

TABLEAU II.- CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE EN WATTS/ CM DEGRÉ DES PRODUITS CALORIFUGES COURANTS

Substances	Masse spécifique gr	100°	200°	300°	500°	700°	Temp. limite d'utilisation	Observations
Terre d'infusoires agglomérée (Kieselguhr)....	0,4 0,5 0,8	0,0010 0,0012 0,0020				0,002 0,0023 0,0035	1100°	
Carbonate de magnésie aggloméré.....	0,2 0,4	0,0007 0,00084		0,0009 0,0011				
Briques de verre cellulaire	0,5	0,0012					500°	
Poudre d'infusoires.....	0,1 0,6 1,4	0,0005 0,0010 0,0024			0,0012 0,0015 0,0028		900°	Les poudres d'oxydes réfractaires de même finesse ont des conductibilités très voisines de celles ci-contre.
Bourre d'amiante.....	0,22	0,0005			0,0010		600°	
Bourres de verre	0,2 0,5	0,0005 ,0008			0,0011 0,0014		500°	
Noir de fumée calciné...		0,0003				0,0008	3000°	

cultés sérieuses lorsqu'on utilise comme "resistors" des tiges ou des cylindres très conducteurs et de forte section ; l'on est alors amené à employer de très fortes intensités sous de faibles tensions.

Pareilles difficultés ne se rencontrent pas dans le second type de fours (b) appelé four à induction ; ici la transmission de l'énergie électrique se fait par "induction" entre l'enroulement inducteur et la substance conductrice placée à son intérieur ; si l'enroulement inducteur est parcouru par un courant de fréquence suffisante, en général assez élevée, ce qui a valu à ces fours le nom de fours à "haute fréquence", la substance devient elle-même le siège de courants "induits" qui l'échauffent. Cette transmission d'énergie par induction s'effectue, quel que soit le milieu interposé entre l'enroulement et la substance, même si ce milieu est le vide ; dans la pratique on disposera entre eux un isolant thermique qui permettra de maintenir la substance à haute température alors que l'enroulement reste froid ; cette disposition a évidemment l'avantage d'éviter toute souillure de la substance.

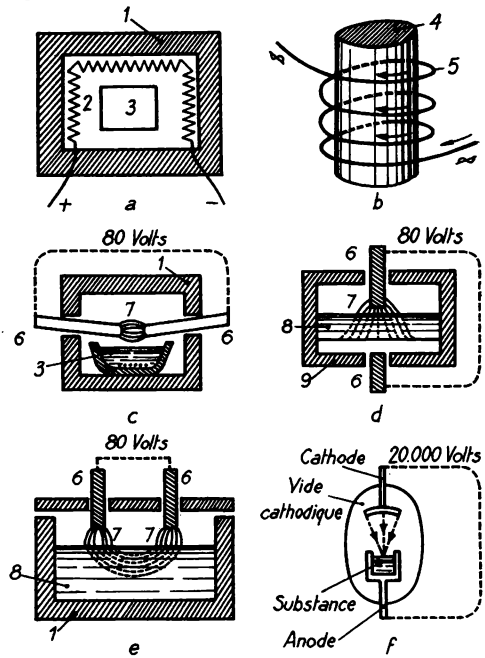


Fig. 2. - Schéma des divers types de fours électriques

a. Four à résistance.
b. Four à induction sans noyau magnétique
c. Four à arc rayonnant.
d. Four à arc à sole conductrice.
e. Four à arc double.
f. Four à rayons cathodiques.

1. Enveloppe réfractaire; 2. Résistance chauffante; 3. Substance à chauffer; 4. Substance conductrice de l'électricité; 5. Enroulement inducteur parcouru par un courant H F; 6. Electrodes de l'arc; I. Arc électrique; 8. Métal; 9. Sole conductrice.

Dans le four électrique à arc rayonnant (schéma c) la chaleur est produite par un arc jaillissant entre électrodes (de carbone en général), elle est ensuite rayonnée vers la substance ; une enveloppe calorifuge limite au maximum les pertes de chaleur vers l'extérieur. La tension électrique à établir aux bornes de l'arc est d'environ 80 volts.

Les schémas d et e, applicables à la fusion de métaux ou alliages, ne sont guère utilisés que dans l'industrie ; dans ces fours, l'arc jaillit entre une électrode de graphite et la surface du bain métallique. Ces deux dispositions, ainsi que celle de l'arc rayonnant, ont évidemment l'inconvénient de souiller la substance par le carbone dont les vapeurs se forment au sein de l'arc.

Dans le schéma f (four cathodique) l'échauffement de la substance est obtenu en concentrant sur elle un faisceau d'électrons émis dans le vide par une cathode ; ici, l'émission d'électrons

nécessite une tension élevée de plusieurs dizaines de kilovolts, établie entre l'anode et la cathode, l'anode étant métallique et servant de support de la substance.

FOURS ÉLECTRIQUES A RÉSISTANCE

Les résistances de chauffe

Dans la réalisation des fours électriques à résistance, selon les températures que l'on désire atteindre, on utilisera comme résistance de chauffe des alliages ou métaux variés, le carbone sous forme de carbone amorphe ou de graphite, et enfin des conducteurs de seconde espèce, présentant une plus grande résistivité, et dont le plus utilisé est le carbure de silicium (carborundum)

Le tableau III donne les constantes physiques essentielles de ces divers corps, classés par ordre de températures d'utilisation croissantes ; quelques remarques sont jointes concernant les conditions pratiques de leur emploi.

En règle générale, on peut dire que jusqu'aux températures ne dépassant pas 1.200° la préférence sera donnée aux résistances à base de nickel-chrome, relativement peu coûteuses, pouvant s'obtenir en fils ou rubans de tous diamètres et épaisseurs.

Au delà de 1.100°, il convient de faire appel à des corps plus réfractaires ; platine jusqu'à 1.400°, carborundum sous forme de baguettes jusqu'à 1.450°, molybdène jusqu'à 1.600°, tungstène permettant de dépasser 2.000° si l'on a soin d'éviter son contact direct avec des oxydes réfractaires, et enfin le carbone (graphite artificiel de préférence) dont l'emploi sous forme de tube permet d'atteindre aisément 2.500°. Ces trois derniers corps doivent être protégés de l'action de l'oxygène ; le molybdène et le tungstène seront placés dans le vide ou en atmosphère réductrice.

En fait, les températures pratiques d'emploi de ces divers corps sont limitées par leur oxydation plus ou moins rapide à l'air (nichrome), par leur évaporation (platine, molybdène, tungstène, carbone) ou par leur dissociations (carborundum) ; aussi a-t-on toujours avantage à utiliser des fils résistants de fort diamètre dont la durée de service est nettement supérieure.

Fours à enroulement de Nichrome

Parmi les fours à résistance, le plus couramment utilisé est le four à enroulement de nichrome, que tout laboratoire doit être en mesure de réaliser avec des moyens de fortune, à condition de posséder les pièces réfractaires nécessaires. Un premier mode de réalisation consiste à enrouler le fil de chauffe sur la partie extérieure d'un tube réfractaire, rainuré ou non (fig. 3) . Pour les faibles diamètres de fil, aucune précaution

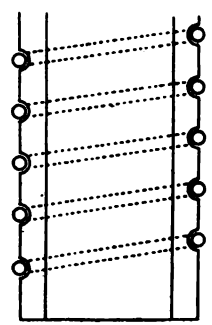


Fig. 3. - Schéma d'un bobinage de fil résistant sur tube rainuré.

n'est à prendre ; pour les diamètres de 2 mm. ou plus, il est nécessaire d'échauffer le fil par un courant convenable pour en faciliter le bobinage ; il est également commode d'enrouler d'abord le fil, au tour, sur un mandrin de diamètre un peu plus faible que le tube ; par élasticité, le fil vient se placer dans les rainures.

La fixation du fil à chaque extrémité de l'enroulement peut s'effectuer par une simple boucle, ou mieux, grâce à un collier de serrage ou une attache faite d'un fil traversant un trou percé dans la paroi du tube (fig. 4). Après terminaison du bobinage et de la fixation, il est recommandé d'enduire la surface extérieure du tube d'un ciment réfractaire de façon à noyer le fil dans la masse du ciment. On y trouve l'avantage d'une fixation du fil qui évite les court-circuits entre spires au cours des chauffes et refroidissements successifs du four ; une telle disposition limite également l'accès de l'air au fil et les risques d'oxydation ; elle présente aussi l'avantage d'une meilleure transmission de la chaleur du fil au tube. Dans ce même but, on donnera la préférence aux rubans dont la surface de contact avec le tube est plus élevée à section égale, que celle d'un fil cylindrique. Le ciment étant mis en place à l'état humide, on le séchera par un faible courant envoyé dans le fil.

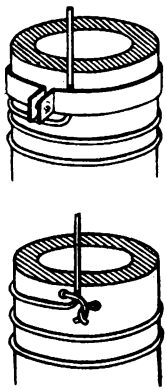


Fig. 4.-Fixation de la spirale chauffante sur son support.

Le calorifugeage du four est réalisé par une forte épaisseur de poudre (terre d'infusoire, alumine calcinée) disposée à l'intérieur d'une enveloppe métallique ou encore dans un tube improvisé fait d'un carton enroulé sur lui-même et maintenu par des colliers de serrage ou un simple fil de fer. La partie du fil de chauffe qui traverse la poudre calorifugée risquant de subir un échauffement anormal, il est recommandé de replier ce fil deux ou trois fois sur lui-même jusqu'aux amenées de courant extérieures Pour un four d'usage prolongé, on se trouvera bien d'utiliser une enveloppe métallique sur laquelle seront fixées deux bornes de sortie isolées de la carcasse par un isolant approprié ; on évitera ainsi des ruptures de fil résultant des tractions répétées au moment de la mise en service du four.

Nous avons précisé plus haut les raisons pour lesquelles on devait donner la préférence à un enroulement rayonnant directement vers la substance, sans interposition d'un réfractaire. Dans les fours de grandes dimensions, on tapisse la paroi intérieure du four par une résistance (fil ou ruban) disposée en forme de sinusoide et accrochée à des pièces réfractaires ; des sorties effectuées à travers la paroi du four permettent un fractionnement de la résistance ; suivant la puissance cherchée, le groupage des diverses parties peut se faire de l'extérieur soit en série, soit en parallèle.

Pour la réalisation d'un four cylindrique de laboratoire, à enroulement intérieur, deux cas sont à envisager. Si l'on dispose d'un tube réfractaire rainé intérieurement, on réalisera un boudin de fil de nichrome sur un mandrin de diamètre un peu supérieur à

celui du tube. Le boudin sera ensuite introduit dans le tube rainuré en le tordant de façon à diminuer son diamètre et on le laissera ensuite prendre sa place par élasticité dans les rainures. Cette disposition ne convient évidemment que pour des fils assez rigides, c'est-à-dire d'un diamètre d'au moins 2 mm. ; pour de gros diamètres de fils (4 ou 5 mm.), l'emploi d'un tube rainuré n'est pas indispensable, le boudin gardant une rigidité suffisante pour ne pas s'affaisser à chaud. Nous avons déjà indiqué que l'emploi de gros fils donnait l'avantage d'une très grande durée d'utilisation et permettait la réalisation de hautes températures : il a par contre le léger inconvénient de nécessiter un transformateur d'alimentation fournissant des intensités élevées sous de faibles tensions ; nous préciserons un peu plus loin les caractéristiques de ce transformateur.

Dans le cas où l'on désire utiliser un fil fin, pour servir directement sur le secteur par exemple, la technique suivante conduit à une réalisation commode. A l'intérieur d'un tube de carton de diamètre et de longueur convenables, on dispose un manchon de bois, fendu suivant un plan diamétral et que l'on peut maintenir serré contre le tube par deux coins placés à chaque extrémité. On bobine le fil (ou le ruban) de nichrome sur le carton et on l'enduit ensuite d'une épaisse couche de ciment réfractaire (genre alundum) que l'on sèche ensuite lentement jusqu'à ce qu'il ait atteint une dureté suffisante. On démonte ensuite le manchon de bois en enlevant les coins, on fait passer dans le fil un courant d'intensité croissante de façon à atteindre, au bout d'un temps assez long (un ou deux jours), la température de régime et à obtenir un durcissement complet du ciment ; le tube de carton aura brûlé au cours de l'opération et finalement le fil de nichrome affleurera à l'intérieur du four.

Dans ce qui précède, nous avons envisagé uniquement le nichrome pour la constitution des résistances de chauffe ; l'emploi d'alliages à base de fer, chrome, aluminium (tableau III) beaucoup plus délicat exige des précautions spéciales que l'on trouvera dans la notice du fabricant.

Fours à enroulement de métaux réfractaires

Avant l'apparition du molybdène et du tungstène comme métaux d'usage courant, les laboratoires utilisaient fréquemment le platine pour la réalisation de fours susceptibles d'atteindre 1.400°. Le prix élevé de ce métal conduisait à employer des rubans très minces (de l'ordre de 0,01 mm.) enroulés sur un tube réfractaire aussi exempt de silice que possible ; l'adhérence du ruban était obtenue par un enduit d'aluminate de chaux ou de magnésie qui recouvrait totalement le ruban sur une épaisseur de 4 à 5 mm. Malgré les précautions prises, de tels fours ne permettaient pas un usage prolongé aux températures voisines de 1.400° par suite d'une évaporation lente du platine ; le prix élevé du métal reste, actuellement encore plus qu'autrefois, un obstacle à la construction courante de tels fours.

On leur substitue des fours à enroulement de molybdène permettant d'atteindre aisément 1.500°, mais nécessitant toutefois une atmosphère réductrice dans la zone où se trouve l'en-

roulement. La figure 5 donne le détail d'un four réalisé au laboratoire des Hautes Températures et qui a permis d'atteindre pendant plusieurs centaines d'heures la température de fusion du palladium (1.555°).

Le fil de molybdène B, de diamètre 1 mm., est enroulé sur un tube A en produit silico-alumineux, de diamètre 4 cm. et de longueur 60 cm. Ce tube passe aux deux extrémités à frottement doux dans une manchette C à circulation d'eau, percée d'une ouverture H pour le passage du fil (1) et d'une ouverture F pour la circulation du gaz réducteur (hydrogène). Autour du tube A se trouve un second tube réfractaire A' dont les extrémités s'engagent dans les rainures K pratiquées dans les manchettes refroidies; un peu de ciment introduit dans ces rainures avant le montage du four assure une étanchéité suffisante. L'extérieur du tube A' est garni de poudre d'alumine calcinée J, disposée dans une enveloppe métallique L munie de flasques flexibles G.

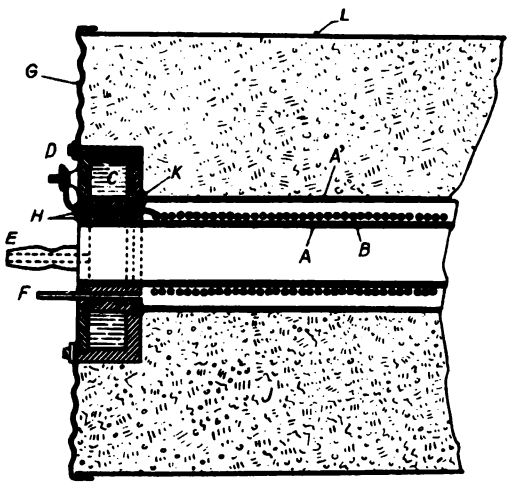


Fig. 5.- Four à mobydbène.

AA'. Tubes en porcelaine.
B . Enroulement chauffant.
C . Manchette à circulation d'eau.
D . Borne d'amenée du courant (sortie par l'autre face).
E . Tubulure d'entrée de la circulation d'eau.
F . Amenée d'hydrogène.
G . Flasque ondulée.
H . Joints en ficelle d'amiante ou cire molle.
J . Poudre d'alumine.
K . Ciment.
L . Enveloppe du four.

Pour atteindre 1.550°, la puissance à dépenser est d'environ 1.000 watts ; le fil utilisé, de longueur 25 m. environ, a une résistance à chaud de 12 ohms ; alimenté directement sur le secteur 110 volts, le courant absorbé est d'environ 9 ampères.

On peut atteindre avec le tungstène des températures plus élevées qu'avec le molybdène ; toutefois, dès que l'on dépasse 1.800°, ce métal réagit énergiquement sur les oxydes réfractaires courants ; ceci entraine au-dessus de 1.800° la nécessité d'éviter le contact entre le métal et le réfractaire. On y arrivera en utilisant un fil d'assez grand diamètre, suffisamment rigide pour qu'à haute température les spires se soutiennent elles-mêmes, en position verticale du moins.

(1) Il n'y a aucun inconvénient à faire cette ouverture assez grande ; on assure l'étanchéité au moyen de ficelle d'amiante. De même, la manchette C porte en H une rigole que l'on bourre de ficelle d'amiante.

On a pu par ce moyen atteindre et dépasser 2.000°, mais à conditions de disposer de tubes réfractaires spéciaux (zircone, thorine) capables de supporter cette température. En fait, de tels tubes sont peu courants en longueurs dépassant 15 à 20 cm,. et d'autre part, il est assez difficile de trouver dans le commerce du gros fil de tungstène en longueur suffisante.

Puissance nécessaire Calcul des éléments électriques d'un four

La fixation de la puissance nécessaire pour atteindre une température fixée dans un four de dimensions géométriques données est chose délicate ; une telle puissance, pour un volume donné de four, dépend de la forme du four ; elle est plus élevée pour un four court que pour un four allongé. En vérité, dans la plupart des cas, les pertes latérales à travers les calorifuges sont faibles par rapport aux pertes par les extrémités du four ; sauf nécessité contraire, il convient de bien obturer les faces extrêmes et d'éviter un rayonnement direct vers l'extérieur. En effet, la puissance rayonnée par 1 cm^2 de l'ouverture d'un four a respectivement les valeurs suivantes : 13, 80, 170, 750 watts aux températures 1.000, 1.500, 2.000 et 3.000°.

On peut admettre comme ordre de grandeur très approximatif, pour des fours de laboratoire bobinés sur tube réfractaire dont la longueur est au moins 7 à 8 fois le diamètre et convenablement calorifugé, les chiffres suivants :

Puissance à développer, en watts par cm^2 de surface intérieure

600°	1.000°	1.500°	2.000°
0,2	0,6	1,4	3

Par exemple, un four à enroulement de nichrome, de diamètre intérieur D = 7 cm., longueur L = 50 cm., c'est-à-dire de surface intérieure 1.100 cm^2, nécessitera pour atteindre 1.100° une puissance P égale à 0,6 × 1.100 = 660 watts.

Il nous parait utile de donner, pour les débutants, les éléments du calcul des caractéristiques d'un four répondant à un but donné. Nous choisirons l'exemple précédent et nous supposerons qu'un tel four doit être alimenté directement sur le secteur de tension V = 110 volts. Le courant à utiliser sera $I = \frac{P}{V} = \frac{660}{110} = 6$ ampères ; et par suite la résistance R à donner au fil doit être d'environ $R = \frac{110}{6} = 19$ ohms.

Pour ne pas fatiguer inutilement le fil, il y a avantage, nous l'avons vu, à ce que sa surface utile soit très grande, c'est-à-dire qu'il recouvre aussi complètement que possible la surface support. Nous admettrons qu'entre les spires on ménage un intervalle égal au diamètre du fil ; dans ces conditions, si d est le diamètre du fil, n le nombre de spires, on doit avoir ; $n = \frac{L}{2d}$; la longueur L du

fil sera égale à πDn et la résistance électrique aura pour valeur :

$$R = \rho \frac{L}{\frac{\pi d^2}{4}} = \rho \frac{\pi Dn}{\frac{\pi d^2}{4}} = 2\rho \frac{DL}{d^3}$$

ρ désignant la résistivité du fil à sa température d'utilisation (1.200° environ) $\rho = 110.10^{-6}$ ohm/cm.

De la dernière formule on tire aisément :

$$d^3 = \frac{2\rho DL}{R} = \frac{2 \times 110.10^{-6} \times 7 \times 50}{19} \text{ ou } d = \sqrt[3]{\frac{77}{19}} \cdot 10^{-3}$$

dans laquelle d est exprimé en cm. Si l'on exprime d en mm., on trouve :

$$d = \sqrt[3]{\frac{77}{19}} = \sqrt[3]{4} = 1,6 \text{ mm}$$

On adoptera donc du fil de diamètre 1,6 mm. Le nombre n de spires sera égal à $\frac{500}{3,2}$ = 156 et la longueur L du fil $\pi Dn = 0,22 \times 156 = 34$ m.

Organes de réglage de la température du four

La valeur admise plus haut pour la puissance nécessaire n'est qu'approximative ; de plus, en règle générale, on désire faire varier dans des limites plus ou moins étendues la température du four ; il est donc nécessaire de disposer d'organes de réglage du courant pris par le four. Nous croyons utile de préciser la valeur des résistances de réglage à adopter, ainsi que la façon de les réaliser.

Nous choisirons encore l'exemple concret précédent ; le lecteur généralisera aisément. Les caractéristiques de ce four, pour atteindre 1.100°, étaient les suivantes ; R = 19 ohms, I = 6 ampères (V = 110 volts). Si nous voulons pouvoir abaisser et régler la température du four jusqu'à environ 500°, la puissance à admettre à cette température sera d'environ 200 watts, ce qui représente dans ce four un courant d'environ 2 ampères. La résistance totale nécessaire pour obtenir ce courant est égale à 110/2 = 55 ohms ; cela conduit à ajouter à la résistance du four (19 ohms) une résistance extérieure supplémentaire de 36 ohms, réglable si possible dans toute son étendue.

Pour les besoins du laboratoire, nous avons été amenés à réaliser de telles résistances, aisées à construire et qui se sont montrées très pratiques. Le schéma en est donné sur la figure 6. Sur une planche support S sont vissées des barres de laiton A séparées les unes des autres par une coupure a, taillée circulairement et destinée à recevoir une fiche en laiton analogue à celles que l'on rencontre sur les boites de résistances. Sur ces barres A sont fixés des fils résistants F (ou des lames pour les forts courants), en maillechort ou en nichrome, passant sur des poulies P et allant d'une barre à l'autre. De part et d'autre de la fiche numérotée 1

est disposée une longueur de fil déterminée ; de part et d'autre de la fiche numérotée 2 est connectée une longueur double ; de part et d'autre des fiches 4 et 8, on dispose respectivement des longueurs égales à 4 et 8 fois la longueur unité. Comme on le voit sur la figure, la mise en place d'une fiche court-circuite la résistance correspondante et, par le jeu convenable des fiches, on peut obtenir toutes les valeurs de la résistance, d'unité en unité, depuis 1 jusqu'à 15 (1). Si l'on désire un réglage fin, portant sur une fraction d'unité, on disposera de part et d'autre d'une fiche supplémentaire R un fil de plus forte section, un câble souple C en cuivre connecté sur la borne d'entrée B permettra, grâce à une borne coulissable b, d'introduire dans le circuit une résistance supplémentaire réglable égale à une fraction d'unité. On remarquera que le déplacement de b ne coupe pas totalement le courant du four, il ne le modifie que d'une assez faible quantité ; si l'on veut limiter les sauts de courant à une valeur encore plus faible, on utilisera un second câble et une seconde borne b' et l'on s'arrangera pour que l'une des bornes reste serrée pendant le léger déplacement de l'autre.

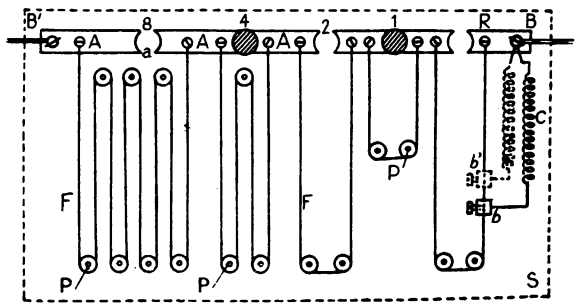


Fig. 6. - Rhéostat de réglage du four électrique.

De telles résistances donnent entière satisfaction ; elles sont nettement préférables aux résistances à curseur qui, quoi que l'on fasse, donnent fréquemment de mauvais contacts et des coupures de courant. Elles sont peu encombrantes et peuvent se visser sur le rebord d'une table. Bien entendu, on choisira les fils F en rapport avec la résistance à réaliser ; si nous revenons encore au cas concret envisagé ci-dessus, dans lequel nous nous proposions d'ajouter au four une résistance supplémentaire de 36 ohms, chaque unité de résistance devra avoir une valeur d'environ 36/15 = 2,4 ohms ; elle devra pouvoir supporter 6 ampères. A la vérité, les fils de la fiche 8 par exemple, dont la résistance est de 19 ohms, n'auront à supporter que 3 ampères et l'on pourra les choisir de plus faible section. Dans la description qui précède, ce sont, bien entendu, les résistances des fils et non leurs longueurs qui entrent en jeu.

L'emploi d'un rhéostat pour régler la température d'un four ne se justifie que si la tension à utiliser aux bornes du four

(1) Le schéma (mise en place des fiches 4 et 1) fournit une résistance de 10 unités.

TABLEAU III.- RÉSISTANCES DE CHAUFFE POUR FOURS ÉLECTRIQUES

Substance	Résistivité ρ à 20° en ohms/cm.	Rapport des résistivités à 1.000 et 20°.	Température de fusion	Température limite d'utilisation dans le four
Nichrome (80 Ni, 20 Cr) ...	100.10^{-6}	1,07	1.475°	1.100°(*)(1)
Alliages spéciaux (chrome, aluminium)	140.10^{-6}	1,0	1.500°	1.200°(*)(2)
Platine	10.10^{-6}	4	1.773°	1.400°(*)(3)
Carborundum (Si C).....	0,1 à 0,2			1.400°
Molybdène.....	5.10^{-6}	6	2.620°	1.600°(4)
Tungstène	7.10^{-6}	5	3.380°	2.000°(5)
Graphite artificiel.....	800.10^{-6}	1,1	3.500°	2.300°(6) 2.500°(7)

(*) Cette température-limite s'entend pour des fours avec fil bobiné à l'extérieur d'un tube réfractaire. Elle serait plus élevée dans un four fait d'un tube du métal lui-même.

Observations

(1) Si le fil de chauffe est maintenu en atmosphère réductrice ou très bien protégé de l'accès de l'air.
(2) D'emploi beaucoup plus délicat que l'alliage nichrome. Doivent être placés en atmosphère oxydante.
(3) Le platine rhodié permet d'atteindre une température un peu plus élevée.
(4) Très oxydable à chaud, comme le tungstène. A utiliser en atmosphère réductrice (hydrogène, vapeurs d'alcool).
(5) Dans un vide de 1/100 mm. de Hg.
(6) Dans une atmosphère d'argon (réagit sur les oxydes réfractaires à partir de 1.800°).
(7) La température d'utilisation ci-contre est aisément dépassée dans un four à tube de graphite.

TABLEAU IV.- POUVOIRS ÉMISSIFS MONOCHROMATIQUES DES MÉTAUX ET CORPS USUELS (POUR $\lambda = 0,65\mu$) A DIVERSES TEMPÉRATURES VRAIES (°C)

Corps	Températures (°C)	Pouvoirs émissifs	Corps	Températures (°C)	Pouvoirs émissifs
Cuivre solide		0,11	Cupronickel fondu..... (55/45).....		0,28
Cuivre liquide.....	1.100	0,15	Nichrome.....	600	0,95
-	1.200	0,13	-	1.200	0,80
Fer solide	1.050	0,39	Oxyde de cuivre	1.000	0,80
-	1.530	0,36	-	1.100	0,60
Fer liquide.....	1.535	0,36	Oxyde de fer	800	0,98
Nickel.....		0,37	-	1.200	0,92
Platine solide		0,31	Oxyde de nickel	800	0,96
Platine liquide.....		0,35	-	1.300	0,85
Tungstène	1.000	0,45	Al_2O_3.....	900	0,20
-	2.000	0,43	-	1.700	0,40
-	3.400	0,40	MgO	900	0,20
Carbone (graphite)....	1.000	0,80	-	1.700	0,45
-	2.000	0,85	Porcelaine et briquess		0,25 à 0,50
-	3.000	0,91	Laitiers industriels (moyenne)		0,65
Acier fondu (moyenne).		0,40			

diffère peu de la tension du secteur d'alimentation ; dans le cas contraire, on dissipe en pure perte dans la résistance une puissance de même importance que celle utilisée dans le four.

On évitera cette perte d'énergie en utilisant pour le réglage soit un transformateur, soit une self. Il est commode, en particulier, de disposer d'un transformateur à prises multiples, susceptible de fournir par exemple des tensions de 10 en 10 volts entre 10 et 120 volts. Un tel appareil comporte 12 circuits secondaires indépendants, fournissant 10 volts chacun et susceptibles par exemple de débiter chacun 100 ampères. Le montage de tous les éléments en parallèle (fig. 7, schéma a) permettra de débiter 1.200 ampères sous 10 volts) ; le montage du schéma b fournira 600 ampères sous 20 volts. Dans l'intervalle d'une tranche de 10 volts, on pourra régler la tension au moyen d'une résistance appropriée, absorbant peu de puissance.

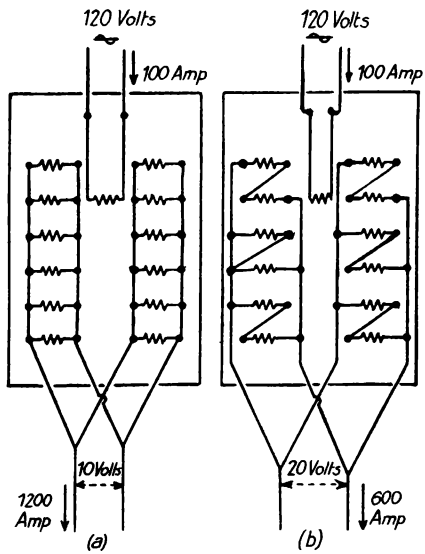


Fig. 7.- Transformateur à combinaisons multiples.

Pour régler la tension aux bornes d'un four, une seconde solution consiste à utiliser une self variable faite d'une bobine parcourue par le courant du four et dans laquelle on enfonce plus ou moins un noyau fait d'un assemblage de fils de fer doux. La section de la bobine et le nombre de tours doivent être assez élevés pour que la tension absorbée soit suffisante lorsque le noyau est totalement enfoncé. Le câble qui constitue l'enroulement devra avoir une section telle que son échauffement, pour le courant utilisé, reste dans des limites raisonnables.

FOURS A TIGES CHAUFFANTES

Dans la construction des fours électriques, au lieu d'utiliser des résistances métalliques disposées sous forme d'enroulements, il peut y avoir avantage à utiliser des tiges chauffantes ; mais, bien entendu, si l'on ne veut pas être amené à faire appel à des courants très élevés sous de très faibles tensions il est nécessaire d'utiliser des substances de chauffe de haute résistivité. En pratique, on n'utilise que le carborundum et le graphite, dont les résistivités sont respectivement 1.000 et 10 fois plus élevées que le nichrome (tableau III). Un même four pourra comporter une ou plusieurs tiges convenablement disposées.

Fours à baguette de carborundum

Les baguettes utilisées sont constituées par du carbure de silicium en grains de finesse convenable, agglomérés sous pression au moyen d'un liant et cuits à haute température. On conçoit que les dimensions des grains, la proportion et la nature du liant ainsi que la température de cuisson, influent sur la résistivité des baguettes. Les divers fabricants s'appliquent à réaliser des baguettes interchangeables présentant entre elles des caractéristiques électriques aussi identiques que possible ; une telle interchangeabilité n'est jamais réalisée de façon parfaite ; d'autre part, le vieillissement des tiges au cours de leur usage (1) oblige à prévoir dans tous les cas un dispositif de régulation de la tension aux bornes du four.

Pour éviter un échauffement excessif des extrémités des baguettes et faciliter l'amenée du courant, certains fabricants prévoient une zone extrême de plus faible résistivité, d'autres y déposent un métal, d'autres enfin accroissent la section de passage du courant aux extrémités en y rapportant et soudant un manchon.

Voici, à titre d'indication, les caractéristiques géométriques et électriques d'une baguette du commerce ;

Partie chauffante : diamètre 14 mm., longueur 250 mm. ; partie renforcée : diamètre 22 mm. ; longueur totale 250 mm. ; résistance électrique à 1.400° : 2,2 ohms ; puissance admissible à 1.400° : 550 watts (2). Dans un four porté à 1.400°, une telle baguette consommera 16 ampères sous 35 volts.

Pour la connexion des baguettes de carborundum avec l'extérieur, diverses solutions peuvent être envisagées :

a - métallisation des extrémité et enroulements de fils inaltérables reliés à la canalisation électrique ;

b - simple contact des extrémités, métallisées ou non, avec des pièces métalliques refroidies ou non par une circulation d'eau et appuyées par un ressort (fig. 8) Il convient de noter que ces baguettes ont une résistance mécanique à la flexion assez faible

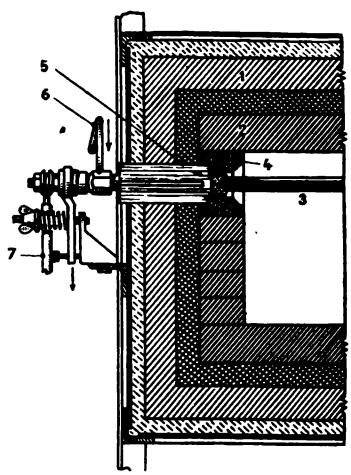


Fig. 8.- Four à tige de carborundum.

1. Calorifuge.
2. Refractaire.
3. Tige de carborundum.
4. Briques spéciales.
5. Tube à circulation d'eau.
6. Tube en caoutchouc.
7. Connexion électrique.

(1) Il tend à accroitre la résistance dans une proportion qui peut dépasser 30 %.

(2) On réalise des baguettes atteignant 1 mètre, de longueur avec un diamètre utile de 18 mm., consommant 2.500 watts.

et nécessitent des précautions dans leur montage et leur utilisation; éviter également de les mettre au contact de corps susceptibles de les attaquer : sels alcalins et alcalino-terreux, carbonates, silicates, etc.

Il paraît difficile de préciser les nombreuses dispositions adoptées dans le montage d'un four à baguettes de carborundum. Leur emplacement dans le four dépend en effet au plus haut point du but poursuivi ; on adoptera évidemment une disposition horizontale des baguettes sous la voûte si l'on désire fondre ou échauffer des objets disposés sur la sole du four ; on disposera, au contraire, les baguettes verticalement sur le pourtour du four si l'on veut chauffer un creuset de forme haute ou un tube traversant verticalement l'axe du four.

La connexion électrique des baguettes, elle aussi, variera suivant les caractéristiques du transformateur dont on dispose. Envisageons, par exemple, la réalisation d'un four nécessitant 1.500 watts pour atteindre 1.400°. On pourra utiliser 3 baguettes identiques à celle indiquée plus haut ; le montage des baguettes en parallèle absorbera 48 ampères sous 35 volts ; leur montage en série demandera 16 ampères sous 105 volts. Si l'on ne dispose pas d'un transformateur capable de débiter 50 ampères sous environ 40 volts, on pourra monter les 3 baguettes en série sur le secteur 110 volts, avec un rhéostat relativement peu important capable de supporter une vingtaine d'ampères. Cependant, chaque fois qu'on le pourra, on donnera la préférence au montage en parallèle, plus souple, mieux équilibré et permettant en outre le remplacement d'une baguette usée, sans avoir à interrompre totalement le chauffage du four ; un tel montage s'adapte également avec facilité au chauffage en courant triphasé.

Nous avons déjà indiqué plus haut que l'emploi du carborundum comme résistance de chauffe ne permet guère de dépasser 1.400° dans l'enceinte.

Fours à tiges de graphite

Dans les fours à tiges, le remplacement du carborundum par le carbone amorphe, ou mieux le graphite, permet d'atteindre des températures nettement plus élevées. On donnera la préférence au graphite artificiel réalisé par l'industrie sous forme de tiges de toutes dimensions, faciles à façonner au tour et susceptibles de supporter, sans évolution sensible autre qu'une usure par oxydation ou vaporisation, des températures superficielles atteignant 2.500°. Toutefois, la faible résistivité du graphite oblige à recourir, à puissance dissipée égale, à des courants importants sous des tensions nettement plus faibles que celles adoptées avec les baguettes de carborundum.

Précisons les ordres de grandeur. La puissance qu'est susceptible de fournir une tige de graphite dépend essentiellement de la température à atteindre dans le four (voir page 126). Envisageons encore ici un cas concret, celui d'un four à porter à 2.000°, de longueur utile 60 cm., absorbant une puissance totale de 10 kW.

Une tige portée superficiellement à 2.300° fournit par cm^2 de surface un taux de puissance égal à 30 watts/cm^2 (1) ; on est ainsi conduit à utiliser une tige de surface égale à 350 cm^2 environ, c'est-à-dire de diamètre 20 mm. Une telle tige a une résistance d'environ 0,02 ohms ; elle nécessitera un courant de 700 ampères sous 15 volts. L'emploi d'une tige de plus grand diamètre, 30 mm. par exemple, serait plus avantageux à beaucoup d'égards ; plus grande rigidité mécanique, température de régime moins élevée amenant une usure moins rapide ; mais elle imposerait des caractéristiques électriques (1.000 ampères, 10 volts) un peu plus difficilement réalisables au laboratoire. L'emploi de courants aussi élevés nécessite un transformateur que l'on devra choisir assez souple pour compenser l'usure progressive de la tige ; l'arrivée de ces courants jusqu'à la tige pose également un problème assez délicat si l'on veut éviter des pertes calorifiques élevées par les pièces d'amenée. Diverses solutions ont été proposées, la figure 9 reproduit la disposition adoptée dans un four industriel à tige centrale dont le succès s'est affirmé au cours des

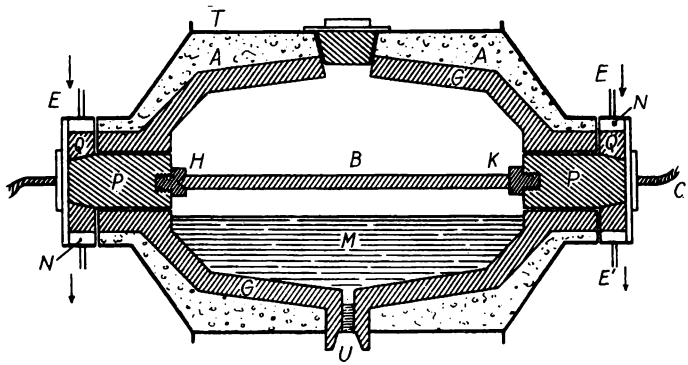


Fig. 9. - Four à tige centrale de graphite

A . Calorifuge.
B . Baguette de graphite.
C,C'. Conducteur d'amenée de courant.
E,E'. Entrée et sortie d'eau.
G . Garnissage réfractaire.
H . Butée en graphite.
K. Pièce de fixation sur la pièce de graphite P.
M. Masse à chauffer.
N. Manchette à circulation d'eau.
Q. Pièce en carbone amorphe.
T. Carcasse en tôle.
U. Trou de coulée.

dernières années, L'électrode de chauffe B est vissée à l'une des extrémités sur une pièce de graphite P, elle-même engagée dans une pièce cylindrique en carbone amorphe Q sertie par une frette métallique à circulation d'eau. L'autre extrêmité de l'électrode, taillée en forme de cône, est appuyée, grâce à un ressort, contre une pièce de graphite identique à la précédente et comportant elle aussi un prolongement en carbone amorphe et une manchette à circulation d'eau. L'emploi de pièces en carbone amorphe réduit sensiblement les pertes calorifiques par les conducteurs d'amenée.

Dans la pratique du laboratoire où la question de rendement joue un rôle secondaire, on peut se contenter d'amener le cou-

(1) En admettant la valeur 0.5 pour le pouvoir émissif total du graphite.

rant à la tige par des pièces métalliques en forme de colliers à serrage progressif et comportant de préférence des stries sur leur surface intérieure ; aux puissances élevées, il sera nécessaire de prévoir un refroidissement par eau. Bien entendu, le même four pourra comporter plusieurs tiges comme nous l'avons vu plus haut pour les fours à baguettes de carborundum.

RÉSISTORS DE FORMES VARIÉES

L'emploi de baguettes rectilignes présente l'inconvénient de nécessiter un accès au four à chacune de ses extrêmités. Pour des raisons de commodité, en particulier dans les fours à vide, on a envisagé des réalisations dans lesquelles l'entrée et la sortie du courant se font sur une même face du four. Une élégante solution du problème consiste à donner à la résistance chauffante la forme d'un U très allongé découpé dans une plaque de graphite. Les parties supérieures de l'U ont une plus grande largeur, de façon à empêcher une élévation excessive de la température au contact des pièces d'amenée du courant. Le lecteur imaginera aisément la disposition et les connexions de ces divers éléments dans un four dont on désire tapisser plus ou moins complètement la paroi verticale intérieure.

Une autre forme est celle en hélice, décrite plus loin.

Fours à tube de carbone

L'emploi d'un tube comme résistance de chauffe peut conduire à des réalisations intéressantes ; en particulier, le tube peut jouer le rôle de paroi réfractaire du four et le calorifuge être mis directement en contact avec le tube. Tel sera le cas des fours à tube de carbone dont l'usage s'est beaucoup généralisé dans les laboratoires.

Toutefois, pour que le four donne toute satisfaction, il importe de souder les extrémités du tube à des garnitures d'amenée du courant, refroidies par une circulation d'eau.

La figure 10 reproduit le modèle de four à tube de carbone adopté au Laboratoire des Hautes Températures. Le tube T est cuivré à ses extrémités par galvanoplastie, puis étamé et soudé dans une garniture en laiton M dont le refroidissement est assuré par une circulation d'eau pénétrant et sortant par les tubes E. Pour permettre la libre dilatation du tube, le cylindre H qui constitue l'enveloppe extérieure est muni à ses deux extrémités de flasques ondulées A en maillechort (épaisseur 0,5 mm.) ; ces flasques sont isolées des garnitures métalliques d'amenée de courant grâce à des rondelles en fibre rouge F, dont la fixation est obtenue par une rondelle métallique et des vis V. Un collier G assure l'étanchéité entre la flasque A et le cylindre H. Un autre collier I, serré sur la garniture M, sert à l'amenée du courant. L'enveloppe extérieure H est remplie de noir de fumée introduit par deux ouvertures ménagées à sa partie supérieure : deux bouchons B empêchent l'accès de l'air dans la masse de noir de fumée.

Aux températures élevées, il importe d'éviter également l'accès de l'air à l'intérieur du tube de carbone ; lorsque l'on désire effectuer des visées pyrométriques dans le four, il est même nécessaire de chasser les fumées par une circulation de gaz inerte (argon ou azote) pénétrant par l'extrémité où se font les pointés pyrométriques. A cet effet, chacune des montures M comportera un prolongement cylindrique extérieur de quelques centimètres de longueur, que l'on coiffe d'un couvercle muni à l'avant d'une glace en verre et, sur les côtés, d'une tubulure d'entrée ou de sortie de gaz.

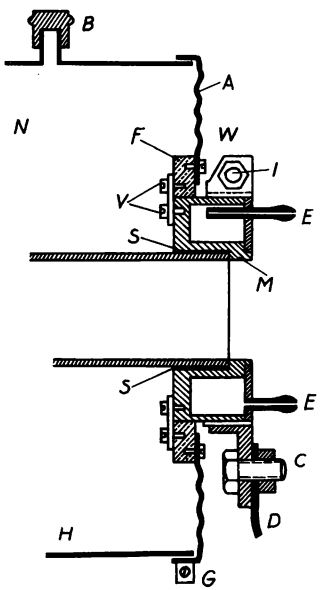


Fig. 10. - Four à tube de carbone (garniture d'amenée de courant).

A. Flasque ondulée en maillechort.
B. Bouchon.
C. Borne d'amenée.
D. Conducteur d'amenée du courant.
EE. Tubulures d'entrée et sortie de l'eau.
F. Couronne de fibre isolante.
G. Collier de fixation sur l'enveloppe H du four.
I. Collier de fixation de l'amenée du courant D sur la manchette
M. Manchette avec refroidissement d'eau.
N. Noir de fumée.
S. Cuivrage et soudure à l'alliage Darcet.
T. Tube de carbone.
V. Vis de fixation de la couronne F sur la manchette M.
W. Vis de fixation de la flasque A sur la couronne isolante F.

Un tel four permet d'atteindre aisément 2.800°C ; au-delà, la vaporisation du carbone devient gênante et amène une usure assez rapide du tube dans la partie centrale, la plus chaude.

Ce type de fours, lorsqu'on veut lui donner de grandes dimensions, nécessite des intensités de courant élevées (10.000 ampères et plus) sous de faibles voltages (quelques volts), ce qui complique beaucoup leur alimentation (1). A cet inconvénient s'ajoute la mauvaise uniformité de température dans le sens de l'axe du tube, dûe à la nécessité de refroidir les pièces d'amenée de courant. Nous verrons plus loin, à propos des fours de haute

(1) Un four de diamètre intérieur 60 mm., de longueur 60 à 80 cm., absorbe environ 1.200 watts pour atteindre 1.500° et 3.600 watts pour atteindre 2.000° C.

Pour un four de diamètre intérieur 30 mm., de longueur 60 cm., les chiffres suivants ont été mesurés ; 1.200 watts (7 V, 180 A), pour atteindre 1.800° et 3.300 watts (11 V, 300 A), pour atteindre 2.500°C. On peut admettre en première approximation que la puissance à dépenser est proportionnelle à la 3° puissance de la température (°C).

fréquence, que cette mauvaise uniformité est totalement supprimée si l'on chauffe le tube (ou un creuset cylindrique fermé à ses extrémités) par courants induits de haute fréquence ; le problème de l'amenée de courant se trouve également résolu sans difficulté en même temps que l'on améliore notablement le rendement calorifique.

Fours à hélice de graphite.- Les inconvénients signalés plus haut pour le four à tube de carbone se trouvent fortement atténués si l'on utilise, au lieu d'un tube continu, une hélice découpée dans celui-ci ; une telle disposition conduit à des intensités nettement plus faibles et à une meilleure uniformité axiale de la température. La facile déformation de l'hélice dans le sens de l'axe permet de supprimer le dispositif de compensation de la dilatation du tube. L'hélice est toutefois plus fragile que le tube et, en particulier, il est recommandé pour son montage de ne pas la découper sur toute son épaisseur, mais de laisser sur la paroi intérieure du tube une faible épaisseur de graphite de l'ordre de 1 mm. que l'on coupe au couteau lorsque l'hélice est mise en place et fixée dans ses garnitures.

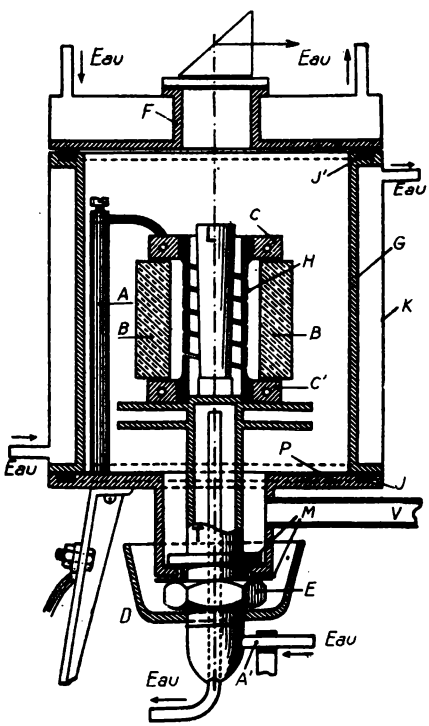


Fig. 11.- Four Chaudron

AA'. Amenée de courant.
B. Manchon réfractaire.
CC'. Colliers de contact.
D. Cuvette remplie de mastic
E. Ecrou de serrage.
F. Fenêtre de visée.
G. Enveloppe étanche.
H. Résistance hélicoidale de carbone.
JJ'. Joints de caoutchouc.
K. Chemise d'eau.
L. Creuset.
M. Joint isolant.
P. Plateforme.
V. Raccord de vide.

Remarquons également que l'emploi d'une hélice ne permet plus, comme dans le four à tube, l'utilisation, comme calorifuge, de noir de fumée disposé directement au contact du résistor ; il est ici nécessaire de placer autour de l'hélice un ou plusieurs tubes réfractaires (dans le cas d'un four à vide, par exemple). La

figure reproduit un modèle de four étudié par Chaudron et Garvin. L'hélice de graphite H est serrée à ses extrémités dans deux colliers CC' ; les amenées de courants s'effectuent, l'une A par la monture métallique du four, l'autre par une pièce T, refroidie par une circulation d'eau et isolée par deux joints spéciaux M ; un écrou E permet le serrage, et la cuvette D remplie de mastic à vide assure l'étanchéité. La protection de l'hélice contre le rayonnement extérieur est obtenue par un cylindre réfractaire B.

Pour les opérations sous le vide, le four doit comporter une enceinte métallique étanche G, entourée d'une chemise d'eau K et reposant sur une plate-forme P ; des joints jj' assurent l'étanchéité avec la plate-forme et le couvercle refroidi F. Le vide est effectué par un conduit latéral V.

Fours à tube métallique. - Le four à tube de carbone garde toujours l'avantage d'une réalisation peu coûteuse alliée à la possibilité d'obtention de températures très élevées ; mais il est des cas où la présence du carbone s'avère très gênante. Aussi a-t-on réalisé pour de nombreuses recherches des fours faits d'un tube métallique chauffé par passage d'un courant électrique.

En raison de la grande conductibilité électrique des divers métaux, si l'on ne veut pas être amené à employer de très fortes intensités, il est nécessaire d'utiliser de faibles épaisseurs de métal, en général quelques 1/100 de mm. Le calcul suivant précisera les ordres de grandeur.

On se propose de dissiper 1.000 watts dans un tube de platine de diamètre 6 cm, de longueur 15 cm. et d'épaisseur 0,02 mm,: la température de régime du four est 1.500°. La résistivité du platine à 1.500° est d'environ 60.10^{-6} ohm/cm ; le cylindre aura donc une résistance R égale à :

$$60.10^{-6}\frac{15}{\pi.6.0{,}002}=25.10^{-3}\text{ohm}$$

Pour dissiper 1.000 watts, il faudra un courant I tel que $RI^2 = 1.000$, d'où $I = \frac{1.000}{25.10^{-3}} = 200$ ampères ; la tension aux bornes du tube sera égale à 5 volts. Un tube d'épaisseur 0,2 mm. aurait une résistance 10 fois plus faible et nécessiterait un courant 10 fois plus élevé, c'est-à-dire d'environ 600 ampères sous 1,7 volt.

Pour amener le courant dans le tube, on utilise le plus généralement deux anneaux plats de même métal, soudés sur les extrémités du tube et fixés sur leur pourtour à une monture métallique annulaire rigide servant de conducteur d'amenée du courant ; les deux montures métalliques sont maintenues à leur écartement par des cylindres réfractaires ou par tout autre moyen.

La plupart des fours à tube métallique utilisés autrefois dans les laboratoires étaient construits en platine ou en iridium ; leur prix actuel serait très élevé et l'on a tendance à les remplacer par des fours à tube de molybdène ou de tungstène. L'utilisation d'un véritable tube n'est pas une obligation absolue et l'on peut se contenter de constituer le four par une lame de métal, enroulée en cylindre et serrée à ses extrémités entre deux pièces

cylindriques, la pièce extérieure formant manchon de serrage et servant d'amenée de courant.

L'emploi d'un tube continu garde toutefois l'avantage de pouvoir utiliser comme calorifuge une poudre disposée à l'extérieur du cylindre, directement en contact avec lui. Cette disposition n'est pas à recommander si la poudre est susceptible de réagir sur le métal à haute température ; on emploiera alors comme calorifuge un cylindre réfractaire ne touchant pas le tube.

Fours à charbon granuleux. - On a cherché depuis longtemps à utiliser le charbon en grains, seul ou mélangé à d'autres corps, pour réaliser la résistance de chauffe, et l'on a proposé dans ce but un très grand nombre de modèles de fours, utilisés aussi bien dans les laboratoires que dans l'industrie. Pour réaliser un tel four, il suffit d'entourer le corps à chauffer (tube, creuset, moufle) d'une couche de charbon granuleux (graphite, coke, charbon de bois), dans laquelle on fait arriver le courant au moyen de deux électrodes de graphite ou de métal.

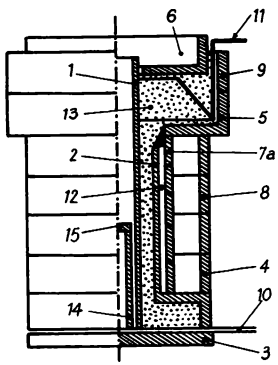


Fig. 12. - Four à charbon granuleux.

1. Tube réfractaire central.
2. Tube réfractaire extérieur.
3. Plaque réfractaire support.
4,5. Pièces réfractaires
6. Couvercle réfractaire.
7,8. Enveloppes calorifuges.
9. Pièce réfractaire
10,11. Electrodes d'amenée du courant.
12. Couche d'air servant de calorifuge
13. Charbon granuleux
14,15. Supports de la substance à chauffer.

La température maximum que l'on peut réaliser dans un tel four est évidemment liée au choix de la matière réfractaire qui constitue la paroi extérieure en contact avec le charbon en grains. Cette paroi extérieure solide doit être très peu conductrice (une enveloppe en carbone solide ne peut convenir) ; on la prendra en silico-alumineux riche en alumine, ou mieux en alumine pure. La partie centrale du four peut être constituée par le creuset ou le moufle à chauffer ; on peut également utiliser un tube réfractaire central, au sein duquel sont placés les divers objets à porter à haute température. La figure 12 donne les détails de réalisation d'un tel four.

On trouve dans le commerce le charbon en grains destiné à ces fours : par un choix convenable du calibrage des grains, on a la possibilité d'alimenter directement ces fours sur le secteur de distribution : en fait, la résistance de contact entre grains joue le rôle essentiel dans la limitation du courant.

De tels fours sont de réalisation commode et peu coûteuse ; ils permettent d'atteindre aisément 1.800° avec des réfractaires appropriés (1). Ils présentent toutefois l'inconvénient de ne pas four-

(1) Un modèle à creuset cylindrique vertical, de diamètre 10 cm. et de hauteur 25 cm. nécessite 7 kw pour atteindre 1.500° et 12 kw pour atteindre 1.800°.

nir une uniformité de température aussi parfaite que les fours à tube ; le courant électrique a, en effet, tendance à emprunter les trajets de température plus élevée ou de plus fort tassement, créant ainsi un certain déséquilibre difficile à éviter totalement.

FOURS A ARC

Nous avons donné plus haut sur la figure 2 (schémas c,d,e) les diverses dispositions adoptées pour utiliser l'arc comme moyen de réalisation de températures élevées. Le four à arc rayonnant (schéma c) est celui qui a été le plus employé au laboratoire il a servi en particulier à Moissan dans ses belles recherches sur la synthèse des carbures, borures, siliciures ; nous allons lui consacrer un paragraphe spécial

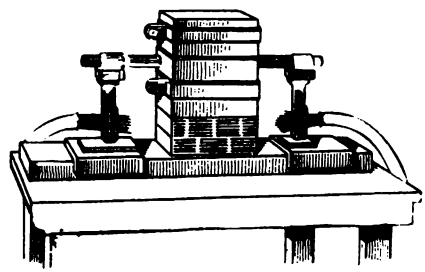


Fig. 13. - Four à arc (Moissan).

Fours à arc rayonnant. - Dans ce type de four, l'échauffement de la substance est obtenu par rayonnement calorifique de l'arc vers la substance contenue dans un creuset. On évite ici le contact direct entre le carbone de l'arc et la substance. La figure 13 reproduit l'aspect extérieur du four utilisé par Moissan : les deux électrodes de graphite, montées sur des supports à glissière, peuvent être amenées en contact, puis écartées après amorçage de l'arc. L'enveloppe extérieure du four est faite d'un bloc de carbonate de chaux dans lequel on a ménagé le logement du creuset et que l'on recouvre d'un couvercle de même substance.

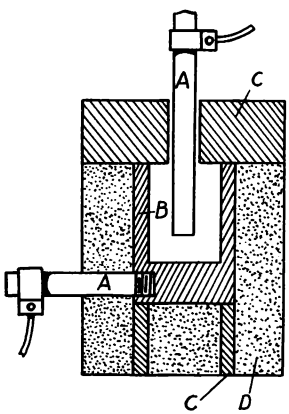


Fig. 14. - Four à arc de laboratoire à sole conductrice.

A. Electrodes d'amenée de courant.
B. Creuset de graphite.
C. Pièces en carbone poreux.
D. Noir de fumée.

Fours à arc à sole conductrice. - Le schéma de la figure 2 peut se concrétiser, au laboratoire, sous la forme reproduite à la figure 14. La sole conductrice est réalisée par un creuset de graphite B ; dans le fond de ce creuset, assez épais, se trouve vissée une tige en graphite A servant d'amenée ; l'électrode supérieure, mobile, pénètre à travers une pièce en charbon poreux. Le creuset est supporté par une autre pièce en charbon poreux noyée dans du noir de fumée D maintenu par une enveloppe extérieure en tôle. L'amorçage de l'arc est produit en amenant l'électrode supérieure en contact avec le fond du creuset. Une telle disposition fournit un excellent rendement calorifique ; elle a évidemment l'inconvénient de carburer de façon notable la substance placée à l'intérieur du creuset.

Four à arc avec tiges noyées dans la substance. - Pour beaucoup d'opérations courantes de fusion, en particulier pour l'obtention d'oxydes réfractaires fondus, il est commode, au laboratoire, de réaliser un arc éclatant au sein même de la substance La figure 15 donne le schéma du montage : de simples briques C peuvent constituer l'enveloppe contenant la poudre D à fondre (1) les deux électrodes A de l'arc sont amenées en contact, puis écartées. La poudre, en fondant, laisse une cavité centrale dont la paroi intérieure est totalement vitrifiée, et dont l'épaisseur est d'autant plus importante que le chauffage a été plus prolongé.

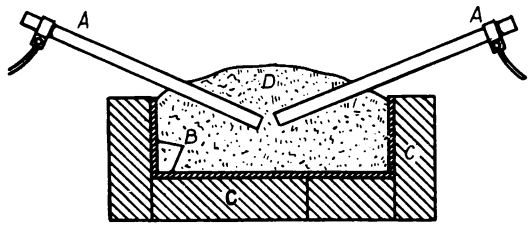


Fig. 15.- Arc improvisé pour la fusion de substances

A. Electrodes.
B. Plaques de graphite.
C. Briques.
D. Substance à fondre.

Dans une telle disposition, on évite assez complètement la carburation de la substance fondue en utilisant des électrodes A trouées suivant leur axe et en envoyant un lent courant d'oxygène par le canal ainsi constitué.

On a fait aux divers types de fours à arc décrits ci-dessus le reproche de provoquer dans la masse chauffée des inégalité brutales de température ; il faut convenir, en effet, que ce mode de chauffage permet difficilement de suivre l'évolution d'une réaction en fonction de la température, mais il convient également de remarquer que sa grande rapidité de chauffe reste un avantage précieux chaque fois que l'on veut éviter au maximum la carburation de la substance (2) aux températures très élevées.

On peut également fondre un métal en faisant éclater l'arc entre une électrode faite du métal aggloméré et le même métal déjà fondu constituant la seconde électrode.

FOURS A INDUCTION

Principe et théorie. - Le four à induction utilise, dans son principe, la production de courants induits provoqués, dans une substance conductrice, par un champ magnétique altérnatif. Le schéma général d'un tel four est donné par la figure 2b dans laquelle 5 représente le solénoide inducteur parcouru par un cou-

(1) On peut, dans certains cas, tapisser l'intérieur de cette enveloppe par des plaques de graphite B.

(2) Cette carburation peut d'ailleurs être grandement réduite, dans le four à arc rayonnant, en brasquant intérieurement le creuset.

rant alternatif de fréquence convenable et 4 la substance conductrice (1) remplissant plus ou moins complètement l'intérieur du solénoide.

Si la fréquence f du courant inducteur est suffisamment élevée, le courant induit se propage uniquement au voisinage de la surface du cylindre, dans une couche d'épaisseur ε donnée par la formule $\varepsilon = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\rho}{f}}$

ρ désignant la résistivité électrique du cylindre ; au centre de la substance, le champ inducteur et le champ induit se compensent exactement pour donner un champ résultant nul. Le tableau V fixe les ordres de grandeur des "épaisseurs de peau" dans divers cas concrets et pour diverses fréquences.

TABLEAU V.- Valeurs approximatives de la couche de peau ε (en cm.) pour diverses substances et différentes fréquences

Fréquences	Cuivre froid $\rho=2.10^3$ cgs	Plomb solide et Cu fondu $\rho=25.10^3$	Mercure froid $\rho=100.10^3$	Platine et fer fondus $\rho=200.10^3$	Graphite $\rho = 1.000.10^3$
50	1	4	8	11	26
500	0,4	1,2	2,4	4	6
2.000	0,2	0,6	1,2	2	4
10.000	0,1	0,3	0,6	0,8	2
100.000	0,03	0,1	0,2	0,3	0,6
1.000.000	0,01	0,03	0,06	0,1	0,2

Si I est l'intensité qui parcourt le solénoide, le champ magnétique inducteur a pour valeur $4\pi n_1 I$, n_1 désignant le nombre de tours par cm ; le champ induit doit avoir la même valeur, et par conséquent, le courant induit sur 1 cm. de hauteur du cylindre doit être égal à $n_1 I$. L'énergie dégagée par effet Joule dans le couche ε, de hauteur h, a dès lors pour valeur, en désignant par d le diamètre du cylindre ;

$$(I)\quad W = \frac{\pi d \rho}{h \varepsilon} . n_1^2 h^2 I^2 = n_1^2 1.2\pi^2 dh\sqrt{\rho f}$$

Dans un solénoide donné et pour une fréquence donnée, l'énergie recueillie dans le cylindre est proportionnelle à son diamètre, elle est proportionnelle à la racine carré de la résistivité du cylindre.

Rendement électrique du four à induction.- En fait, une partie de l'énergie fournie par la source de courant est dépensée dans l'enroulement ; si R_ρ est la résistance de cet enroulement, l'éner-

(1) Nous le supposons cylindrique ; dans ce qui suit, nous supposons également, sauf indication contraire, le solénoide et le cylindre de grande longueur par rapport au diamètre.

gie dissipée à son intérieur est $R_e I^2$, l'énergie dissipée dans le cylindre peut également s'écrire $R_c I^2$ (formule I), R_c désignant la résistivité apparente du cylindre. Dès lors l'énergie totale fournie par la source étant $(R_c + R)\, I^2$ et celle recueillie dans la substance $R_c I^2$, il en résulte que le rendement "électrique" du four a pour valeur :

$$\frac{R_c}{R_e + R_c}$$

Si l'on ne veut pas accroitre inutilement R_e, l'épaisseur du cuivre de l'enroulement devra être supérieure à la valeur de l'épaisseur de la couche de peau dans le cuivre ; dans ces conditions, on démontre aisément que le rendement ne dépend pas de la fréquence, ni du nombre de spires de l'enroulement ; il ne dépend que des valeurs des diamètres et des résistivités de l'enroulement et de la charge. Si les spires sont suffisamment serrées, on peut donner l'expression suivante :

$$D = \frac{d\sqrt{\rho}}{d'\sqrt{\rho'} + d\sqrt{\rho}}$$

d' désignant le diamètre de l'enroulement et ρ' la résistivité du cuivre qui le constitue. Un cylindre de cuivre placé dans un enroulement de cuivre de même diamètre (d' = d) fournit un rendement 0,50 ; un cylindre de graphite donne un rendement 0,96.

Bien entendu, les chiffres précédents ne sont valables que si la substance emplit totalement l'espace offert à l'intérieur de l'enroulement : le rendement diminue d'autant plus que l'espace occupé est plus faible.

Notons enfin que les valeurs données supposent la couche de peau d'épaisseur faible par rapport au rayon du cylindre ; si tel n'est pas le cas, le rendement s'abaisse. Ceci nous amène à préciser les ordres de grandeur des fréquences à adopter pour l'alimentation d'un four destiné à chauffer une substance de dimensions déterminées.

Fréquences à adopter.- En fait, le rendement ne garde sa valeur maximum que si le diamètre du cylindre reste supérieur à 6 ou 8 fois l'épaisseur de peau. Le tableau donné plus haut permet aisément de fixer la fréquence minimum à adopter ; pour le chauffage d'un cylindre de platine de diamètre 6 cm. à porter à la fusion, on utilisera une fréquence fournissant dans ce métal une épaisseur de peau de 1 cm., c'est-à-dire une fréquence de l'ordre de 10.000 périodes ; le même cylindre de graphite demanderait une fréquence de l'ordre de 40.000 périodes. A la vérité, on peut, sans grand inconvénient, descendre un peu au-dessous des valeurs précédentes ; de façon générale, pour un rapport d/ε de l'ordre de 4, l'énergie recueillie tombe à 65% de sa valeur maximum.

Les chiffres mentionnés supposent la substance présentée sous forme d'un cylindre continu ; dans la pratique, on peut avoir à chauffer des morceaux plus ou moins réguliers. L'expérience et le calcul montrent qu'alors le rendement est maximum pour un diamètre des grains voisin de $3,5\varepsilon$. Si l'on veut chauffer avec un

plein rendement des grains de platine de diamètre 1 mm., il faut adopter une fréquence fournissant, dans ce métal, une épaisseur de peau de l'ordre de 0,3 mm., c'est-à-dire voisine de 10^6.

En résumé si, dans l'industrie, où l'on opère sur des masses importantes de métaux ou alliages, on peut, avec un plein rendement, utiliser des fréquences de l'ordre de 1.000 à 2.000 et même la fréquence industrielle 50, au laboratoire, on sera amené, dans la plupart des cas, à employer des fréquences dépassant 10.000 périodes. Nous allons étudier maintenant les moyens dont on dispose pour produire ces fréquences.

Générateurs de haute fréquence.- Ces générateurs sont de trois types, de principes essentiellement différents : alternateurs, installations à étincelles, générateurs à lampes. Nous allons les passer successivement en revue ;

a) Alternateurs ; L'industrie fabrique actuellement des alternateurs de laboratoire fournissant des fréquences 10.000 avec des puissances unitaires allant de 5 à plusieurs dizaines de kilowatts. Ces appareils, entrainés par un moteur monté en bout d'arbre, ont des rendements qui, pour l'ensemble moteur-alternateur, atteignent aisément 0,80.

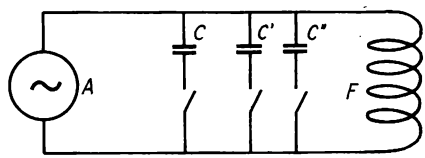


Fig. 16. - Schéma de montage d'une installation à haute fréquence à alternateur.

A. Alternateur.
C. Capacités pour réaliser la résonance.
F. Four.

Un tel alternateur, monté directement sur un four, débiterait une intensité très faible en raison de la self importante du four ; il est nécessaire de compenser cette self en ajoutant, en dérivation sur le four, une capacité réglable, destinée à réaliser assez exactement la résonance. Le schéma de montage est donné par la figure 16 ; des interrupteurs permettent de brancher ou de débrancher des fractions de la capacité ; on est averti de la résonance lorsque l'alternatuer débite un courant maximum. Le réglage de la puissance est obtenu en agissant sur le courant de la dynamo d'excitation de l'alternateur.

Pour un alternateur de 10 kW, les caractéristiques électriques adoptées par le fabricant sont à peu près les suivantes: tension 200 Volts ; intensité maximum 50 Ampères ; la capacité à adopter est de l'ordre de 500 microfarads.

b) installations à étincelles ; Dans une telle installation (fig. 17) un transformateur survolteur T_2, branché sur le secteur alternatif, fournit une tension de l'ordre de 5 à 10.000 volts ; cette tension sert à charger une capacité C disposée en dérivation dans un circuit comportant le four F et un éclateur tournant E ; à chaque passage des pointes de l'éclateur devant des pièces métalliques fixes, il se produit une décharge de la capacité. Cette décharge est oscillante ; sa fréquence est donnée par la relation classique $f = \frac{I}{2\pi\sqrt{CL}}$, désignant la valeur de la capacité et L celle de la self du four. Pour une installation d'une dizaine de kilo-

watts, la capacité à adopter est de l'ordre de 0,2 microfarad ; quant à la self L, sa valeur dépend évidemment des dimensions géométriques de l'enroulement (diamètre, hauteur et nombre de spires). Pour un enroulement de diamètre 6 à 8 cm., de hauteur 15 à 20 cm., comportant une vingtaine de spires, la fréquence obtenue est de l'ordre de 100.000. Si, pour des raisons spéciales, on a besoin d'une fréquence relativement élevée, on diminuera le nombre de spires en utilisant, pour le bobinage du four, du tube de plus grand diamètre.

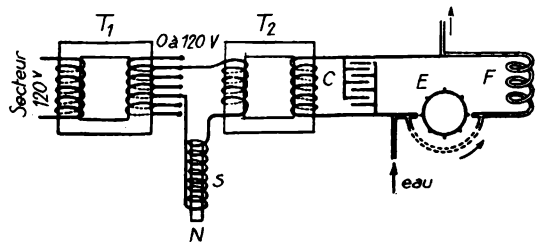


Fig. 17. - Schéma d'une installation à haute fréquence à étincelles.

T. Transformateur survolteur (4.000 à 10.000 colts).
C. Capacité.
E. Eclateur tournant.
F. Four.
S. Self de réglage de la puissance.
T. Transformateur de réglage de la puissance (non indispensable).

La puissance réalisable dans une installation à étincelles dépasse aisément les valeurs utilisées dans la pratique d'un laboratoire (20 à 30 kW) ; des montages spéciaux permettent le branchement sur un secteur triphasé.

Le réglage de la puissance d'une installation donnée s'effectue commodément au moyen d'une ou plusieurs selfs S, dans lesquelles on enfonce plus ou moins un noyau formé d'un faisceau de fils de fer doux (fig. 17) : on accroit encore un peu la souplesse de l'installation en ajoutant à l'entrée un transformateur sousvolteur T_1 à prises multiples, dont on règle la tension à la valeur cherchée; la self S sert alors au réglage entre deux prises successives de T_1.

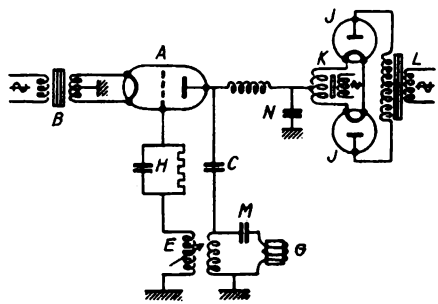


Fig. 18. - Schéma d'une installation de chauffage à haute fréquence à triode

A. Lampe triode oscillatrice.
B. Transformateur de chauffage de la triode.
C. Condensateur d'arrêt.
D. Self de choc.
E. Dispositif de couplage grille-plaque
G. Four.
H. Circuit grille.
J. Valves diodes.
K. Transf. de chauffage des valves.
L. Transf. d'alimentation (4 à 10.000 v).
M. Capacité du circuit oscillant du four
N. Condensateur d'adoucissement.

c) Générateurs à lampes triodes : Dans ces générateurs, le courant haute fréquence est fourni par une lampe triode A, montée

en oscillatrice (fig. 18). Le filament de cette lampe est chauffé grâce à un transformateur B ; la plaque est portée à une tension continue par un transformateur survolteur L branché sur le secteur et deux diodes J fonctionnant comme valves. Les oscillations dans le circuit oscillant du four G sont entretenues grâce à un couplage avec le circuit grille obtenu par l'intermédiaire de la self d'entretien E. Divers organes accessoires ; self de choc D, condensateur d'arrêt C, résistance de grille R, condensateur de grille H, complètent l'installation ; nous n'insistons pas sur leurs rôles respectifs (1).

Dans un tel montage, la tension plaque est de l'ordre de 10.000 volts. La technique livre actuellement des lampes triodes dont la puissance unitaire atteint plusieurs dizaines de kilowatts ; au-dessus de 5 kW, ces lampes doivent être refroidies par une circulation d'eau.

Avantages comparés des générateurs précédents.- Aucun des générateurs précédents ne s'est jusqu'ici imposé, à l'exclusion des autres, du moins dans la pratique du laboratoire. C'est qu'en effet chacun d'eux garde ses avantages et ses inconvénients.

Les générateurs à étincelles sont de prix peu élevé, de maniement extrêmement simple, très robustes et d'entretien à peu près nul ; ils ont toutefois l'inconvénient d'être assez bruyants pour les fortes puissances ; d'autre part, ils ne permettent pas d'atteindre les fréquences très élevées que fournissent les générateurs à lampes.

Chaque fois que l'on ne désire pas dépasser des fréquences de l'ordre de 10.000, comme c'est le cas dans un laboratoire métallurgique qui se propose uniquement des fusions d'alliages, l'alternateur est certainement l'instrument idéal ; très bon rendement grande robustesse ; la nécessité de réaliser la résonance ne constitue pas une sujétion gênante. Son prix, à puissance égale, est toutefois plus élevé (1,5 à 2 fois) que celui d'une installation à étincelles.

Enfin, les installations à lampes triodes s'imposent lorsque l'on désire atteindre les fréquences très élevées (500.000 et plus) nécessaires pour le chauffage de substances en poudres fines ou très peu conductrices. Toutefois, leur rendement global est très inférieur à celui des générateurs précédents ; leur prix d'établissement est également très supérieur ; la nécessité de remplacer les lampes après un fonctionnement d'environ 1.000 heures accroît en outre les frais d'entretien.

Au total, dans un laboratoire richement doté, appelé à s'attaquer à des problèmes de chauffage extrêmement variés, portant en particulier sur des substances peu conductrices, on adoptera un générateur à lampes ; pour la pratique courante d'un laboratoire désireux de réaliser de hautes températures dans des masses métalliques ou dans des objets de formes variées en graphite, l'installation à étincelles reste l'instrument le plus commode d'emploi et le moins coûteux.

---

(1) Le schéma précédent est celui utilisé le plus couramment ; on en a proposé beaucoup d'autres, en particulier pour l'alimentation en triphasé.

Réalisation des fours.- L'enroulement du four est toujours constitué par du tube de cuivre refroidi par une circulation d'eau. Cet enroulement peut être effectué sur un tube de silice fondue en prenant la seule précaution de séparer les spires par une épaisseur de ficelle d'amiante.

L'aménagement intérieur du four lui-même dépend essentiellement du but poursuivi. Si l'on se propose par exemple de fondre un alliage dans un creuset, celui-ci, muni d'un couvercle, sera simplement noyé dans une poudre d'oxyde réfractaire disposée à l'intérieur du tube de silice servant de support à l'enroulement. Cette technique est employée couramment dans notre laboratoire pour la fusion du platine, servant d'étalon pyrométrique, et qui s'effectue dans un creuset de thorine. En ce qui concerne cette fusion, il est bon de faire remarquer que le chauffage s'effectuant au sein même de la masse de métal, celui-ci se trouve être à température plus élevée que le creuset enveloppe ; non seulement le réfractaire résiste mieux que dans tout autre mode de chauffage effectué par l'extérieur, mais, si une fissure vient à se produire dans la paroi du creuset, le métal ne s'échappe pas il vient se solidifier à l'intérieur de la fissure. En fait, un même creuset peut être utilisé pour effectuer plusieurs centaines de solidifications et fusions sans que l'on ait à démonter le four. Il est des cas où la présence d'une poudre calorifuge peut être gênante, en particulier lorsqu'on désire effectuer un très bon vide dans le four. On utilise alors comme calorifuge une ou deux enveloppes centrées sur le creuset et logées entre le creuset et le tube de silice support de l'enroulement.

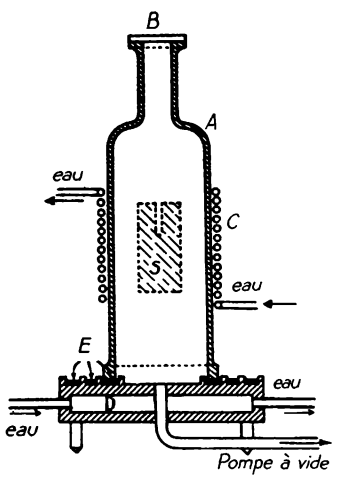


Fig. 19.- Dispositif de chauffage à haute fréquence sous vide.

A. Cloche en silice.
B. Glace de visée.
C. Enroulement inducteur.
D. Plate-forme refroidie par circulation d'eau.
E. Rondelles graissées assurant l'étanchéité.
S. Substance conductrice de l'électricité.
V. Canalisation de vide.

Un four à vide à haute fréquence se présente sous un aspect particulièrement simple en raison de l'absence totale de conducteurs d'amenée de courant dans le métal ou dans le cylindre à porter à haute température. Le schéma d'un tel four est donné par la figure 19 : la substance S à chauffer est disposée sous une cloche en silice fondue A munie à sa partie supérieure d'une partie de moindre diamètre à son extrémité, rodée, sur laquelle peut s'adapter une glace de visée B. La partie inférieure E de la cloche est rodée et supportée par une plateforme rodée D refroidie par une circulation d'eau ; l'étanchéité est assurée par de la graisse à vide, ou encore par une rondelle de caoutchouc graissée sur ses deux faces. Une même plateforme peut d'ailleurs recevoir plusieurs cloches de diamètres différents grâce à des gorges prévue sur sa surface .

L'enroulement inducteur C peut être directement bobiné sur la paroi de la cloche ; on peut également le disposer sur un tube de silice indépendant. Le lecteur imaginera aisément la disposition des pièces supports ou calorifuges soutenant ou entourant la substance S.

Une disposition tout à fait analogue aux précédentes pourra être utilisée pour le chauffage d'un creuset de graphite (ou de métal), noyé dans du noir de fumée (1) ou entouré de cylindres réfractaires calorifuges. Le chauffage par induction permet ici d'obtenir une parfaite uniformité de température au sein du creuset, pour des diamètres dépassant couramment 10 cm. : nous avons vu plus haut qu'une telle uniformité est loin d'être réalisée dans les modèles de fours à tube de carbone.

Dans les cas où l'on désire effectuer des mesures précises de température, des précautions doivent être prises pour éliminer les vapeurs ou fumées produites au cours du chauffage. La figure 20 donne à titre d'exemple, la disposition adoptée à notre laboratoire pour l'étude de la vaporisation et de la fusion du carbone. Un cylindre de graphite 5 de diamètre 2 cm., de hauteur 6 cm., est percé d'un trou axial de diamètre 2 mm., prolongé par deux évents obliques laissant passer le gaz de balayage (argon) ; ce cylindre est supporté par un cône 6 en graphite et prolongé vers le haut par un autre cône 3 également en graphite ; l'ensemble est noyé dans du noir de fumée 4 ; l'entrée du gaz s'effectue par un canal latéral 2 placé immédiatement au-dessous de la glace 1 permettant les visées pyrométriques. Comme à l'ordinaire, l'enroulement inducteur est bobiné sur un tube de silice 10 servant en même temps d'enveloppe pour le noir de fumée. Avec une puissance de 5 kW, une telle disposition permet d'atteindre en 2 ou 3 minutes la température de vaporisation du carbone (3.500°) ; grâce au courant d'argon qui balaie les vapeurs de carbone, les visées pyrométriques se font dans d'excellentes conditions.

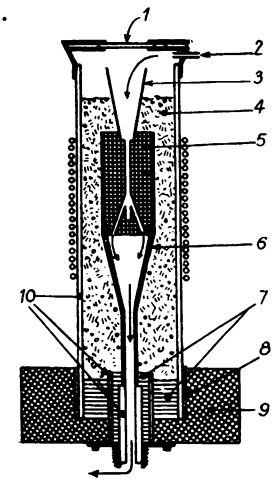


Fig. 20. - Four pour l'étude de la vaporisation du carbone

1. Glace de fermeture et visée.
2. Tube d'entrée du gaz de balayage.
3. Cône en graphite.
4. Noir de fumée.
5. Cylindre de graphite
6. Cône support en graphite.
7. Rondelles d'amiante.
8. Ficelle d'amiante.
9. Support isolant.
10. Pièces en silice.

Le même four peut fonctionner sous un vide partiel, tout en maintenant une circulation d'argon dans le tube central de visée ; il a pu également servir sous pression en disposant tout le four dans une enceinte où règne la pression désirée.

(1) Il est commode d'utiliser comme supports de tels creusets et comme bouchons de fermeture des pièces en carbone poreux facilement usinables à partir de cylindres en charbon poreux (filtres).

Un tel four, comme d'ailleurs les fours d'autres modèles, fours à résistance en particulier, peut être adapté non seulement à des fusions sous le vide, mais aussi à des coulées sous le vide. La description des divers modèles proposés nous entraînerait trop loin ; il nous suffira d'indiquer que les deux dispositions le plus souvent adoptées consistent, soit à prévoir un basculage sous vide, soit à disposer à la base du creuset, un clapet dont l'ouverture amène l'écoulement du métal dans une lingotière .

Puissances nécessaires.- Il nous paraît intéressant de préciser, pour les chercheurs, les ordres de grandeur des puissances nécessaires pour atteindre diverses températures au sein de creusets ou de métaux de dimensions variées.

Dans un creuset de diamètre 2 cm., hauteur 6 cm., renfermant un lingot de platine et noyé dans la poudre calorifuge au sein d'un tube de silice de diamètre intérieur 4 à 5 cm., la température de fusion du platine est aisément atteinte avec une puissance de 2 kW aux bornes de l'installation. Une installation de 5 kW permet d'atteindre la même température dans un creuset de diamètre 4 cm. et hauteur 10 cm. La même température serait également obtenue avec les mêmes puissances dans des cylindres de platine, de molybdène ou de tungstène ayant les dimensions fixées ci-dessus (1)

En ce qui concerne la réalisation assez courante de hautes températures au sein de creusets de graphite noyés dans du noir de fumée, nous pouvons indiquer les chiffres suivants : Une installation de 5 kW à étincelles permet d'obtenir aisément des températures de 1.500, 2.000, 3.000° respectivement dans des volumes de 1.000, 500, 50 cm^3; une installation de 15 kW fournirait les mêmes températures dans des volumes trois à quatre fois plus grands.

Fusion par induction sans creuset.- Dans le cas où l'on veut fondre un métal en évitant de le souiller par le creuset ou le pisé qui le contient, on peut utiliser, comme pisé, de la poudre du même métal très peu agglomérée. On a pu également dans ces dernières années, obtenir la fusion sans creuset en suspendant le métal dans le champ électromagnétique produit par les enroulements du four à induction ; les puissances à développer sont ici beaucoup plus élevées en raison du rayonnement de la masse fondue vers l'extérieur.

FOURS A RAYONS CATHODIQUES

Le chauffage d'une substance quelconque peut être obtenu en la bombardant avec les électrons émis par la cathode d'un tube à rayons cathodiques, en tous points identique au tube classique à émission de rayons X. Dans ce dernier, l'anticathode émettrice de rayons X doit être refroidie si l'on ne veut pas la

(1) Dans un cylindre creux d'épaisseur convenablement choisie, le rendement électrique est même supérieur à ce qu'il serait dans le même cylindre plein.

voir s'échauffer de façon dangereuse ; dans le four à rayons cathodiques au contraire, l'anticathode sera soigneusement calorifugée de façon à la porter à température élevée et éventuellement à la fusion.

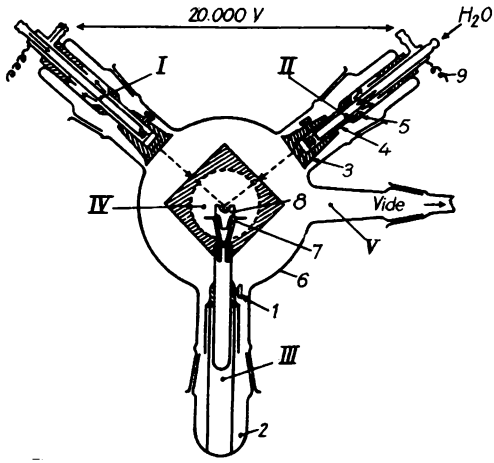


Fig. 21. - Four à rayons cathodiques.

Dans les installations modernes, on utilise un faisceau d'électrons dirigé et focalisé à l'aide d'un canon à électrons (fig. 21). Toute l'énergie est apportée sur la surface à chauffer dans une région bien délimitée, ce qui contribue à accroitre le rendement.

FOURS A CONCENTRATION DE RAYONNEMENT

Pour échauffer une substance, on a imaginé depuis longtemps de concentrer le rayonnement solaire sur sa surface, au moyen de lentilles ou mieux de miroirs (miroirs ardents). Si l'on se rappelle que la constante solaire a pour valeur approximative 2 cal/min/cm^2, on calculera aisément qu'une surface de 1 m^2 reçoit du soleil une puissance de l'ordre de 1 kilowatt.

Dès 1930, la mise en oeuvre de ce principe de chauffage a pu être faite à une assez grande échelle au moyen d'un miroir plan d'environ 3 m de diamètre, entrainé par un héliostat, et renvoyant les rayons solaires sur un miroir concave fixe de même diamètre. Au foyer de ce miroir se trouve placé le corps à chauffer. Une telle disposition a permis de porter un cylindre de tungstène à des températures dépassant 3.000° en moins d'une demi-minute.

Dans les installations plus récentes où l'on utilise des miroirs de plus grandes dimensions permettant d'obtenir 60 kW, le corps à chauffer peut rayonner lui-même directement dans l'espace ambiant ou mieux être placé dans une enceinte fermée et calorifugée au sein de laquelle le rayonnement solaire est introduit par une petite ouverture. Suivant les dimensions respectives du corps et de l'enceinte, on peut ainsi réaliser des températures

dépassant 3.500°. De telles installations nécessitent évidemment un matériel important, elles sont en outre à la merci du rayonnement solaire.

On a cherché à tourner cette dernière sujétion en utilisant comme source de rayonnement un arc électrique puissant placé au foyer d'un miroir concave ; les rayons parallèles sortant du miroir sont reçus sur un second miroir concave, au foyer duquel se trouve placée la substance à chauffer ; il s'agit là, en fait, d'une vieille expérience classique dont le matériel de réalisation se trouve dans la plupart des collections des laboratoires de physique. Une telle technique est susceptible de rendre des services dans des cas très particuliers ; on ne saurait la généraliser dans la pratique courante de réalisation des températures élevées.

FOURS A FLAMMES

Température de combustion d'un mélange.- Un mélange combustible, fait d'un combustible et d'un comburant (air ou oxygène) en proportions données, peut être caractérisé par sa température de combustion ; c'est la température à laquelle les produits de la combustion se trouvent portés grâce à la chaleur de réaction, en l'absence de tout refroidissement. C'est évidemment la température maximum à laquelle on peut porter une enceinte chauffée au moyen de ce mélange combustible ; c'est aussi la température de la flamme obtenue avec ce mélange (chalumeau).

TABLEAU VI.-TEMPÉRATURES DE COMBUSTION THÉORIQUES DE DIVERS GAZ BRÛLANT DANS L'OXYGÈNE ET DANS L'AIR

Gaz Combustible	Combustion dans l'oxygène	Combustion dans l'air	
		pris à 20°	pris à 1.000°
Gaz de ville.....	2.800°	1.960°	2.380°
Hydrogène	2.750°	2.040°	2.380°
Oxyde de carbone....	2.825°	2.090°	2.360°
Méthane	2.720°	1.875°	

Gaz combustible	Combustion dans l'oxygène	Combustion dans l'air pris à 20°
Propane	2.750°	1.920°
Butane.....	2.760°	1.925°
Acétylène.....	3.100°(1)	2.220°

(1) Dans la proportion $C^2 H^2 + O^2$

Dans la réalisation des hautes températures, il est intéressant de posséder les valeurs de cette température de combustion pour les divers combustibles courants brûlant dans l'air ou l'oxygène. Le tableau VI reproduit quelques-unes de ces valeurs, valables pour la combustion théorique sans excès ni insuffisance de

comburant ; les colonnes 2 et 3 donnent ces températures de combustion dans l'oxygène et l'air, les gaz étant pris initialement à la température ordinaire ; la colonne 4 suppose l'air de combustion préchauffé à une température de 1.000°.

Il reste entendu que si le mélange combustible n'est pas effectué dans les proportions théoriques, la température de combustion est inférieure aux valeurs ci-dessus ; en outre, la température de régime fournie par un tel mélange chauffant une enceinte s'écarte d'autant plus de la température de combustion que l'enceinte est plus mal calorifugée et que le volume de gaz admis est plus faible.

Le tableau précédent fait, en outre, ressortir nettement le gain très sensible de température obtenu par un préchauffage convenable de l'air de combustion ; un préchauffage de 1.000° fait passer de 1.960 à 2.380° la température de combustion théorique du gaz de ville. Nous indiquerons plus loin comment peut s'obtenir ce préchauffage par récupération de la chaleur emportée par les fumées du four.

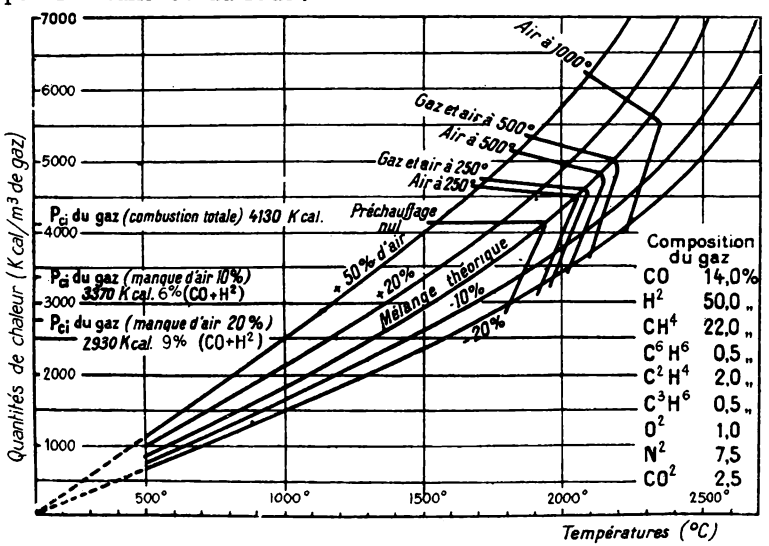


Fig. 22. - Chaleurs d'échauffement (enthalpies) des produits de combustion du gaz de ville et températures de combustion des divers mélanges avec excès ou défaut d'air.

Diagramme des températures fournies par un combustible. Pour un combustible donné, il est commode de tracer le diagramme fournissant toutes les températures de combustion susceptibles d'être atteintes par divers mélanges air-combustible (ou oxygène - combustible) et pour diverses températures de préchauffage. La figure 22 reproduit le diagramme établi pour le gaz de ville normal (pouvoir calorifique supérieur 4.500 cal.) ; en ordonnées sont portées les quantités de chaleur mises en jeu (rapportées au m³) et en abscisses les températures. Avec un excès d'air de 20 % et sans préchauffage, la température de combustion est égale à 1.790° ; avec préchauffage de l'air à 1.000°, cette température s'élève à 2.210°.

Les températures relatives à un défaut d'air de 20 % sont à peu près identiques ; pour un tel mélange, les fumées renferment une teneur en gaz réducteurs (CO et H_2) d'environ 9 %.

Nous pensons utile de reproduire également la courbe fixant les températures de combustion du mélange acétylène-oxygène en proportions variables (fig. 23) ; on y verra en particulier que la température maximum ne correspond nullement à la composition qui donnerait la combustion complète de l'acétylène en CO_2 et H_2O, mais bien à une composition voisine de $C_2H_2 + O_2$ fournissant comme produits de combustion CO et H_2 ; la température correspondante est d'environ 3.100°, la même figure précise la composition des produits de la combustion pour les divers mélanges ; on y remarquera que pour les mélanges $C_2H_2 + O_2$ (chalumeau oxy-acétylénique normal), la teneur en hydrogène atomique est extrêmement élevée, ce qui confère à la flamme correspondante, outre une température très élevée, des propriétés réductrices très marquées, favorables pour toutes les opérations de soudure.

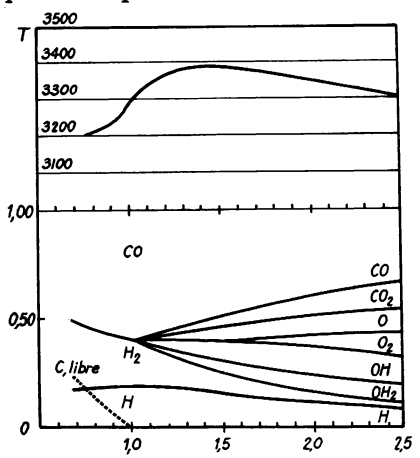


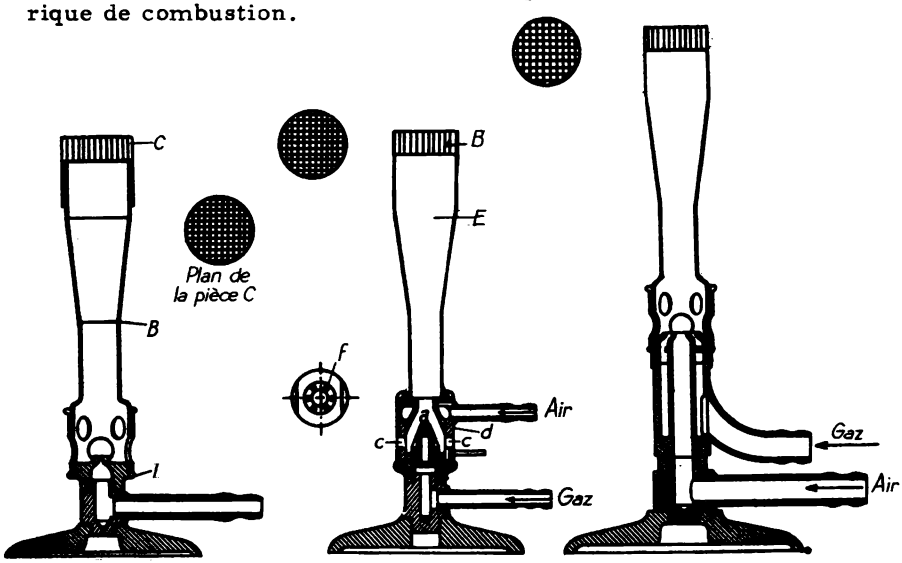
Fig. 23. - Graphique théorique de la combustion de l'acétylène dans l'oxygène sous la pression atmosphérique

Brûleurs à mélange préalable (Bunsen, Méker). - Dans tout brûleur, on se propose, d'une part d'obtenir un mélange convenable de combustible et de comburant, et d'autre part de provoquer la combustion de ce mélange à la sortie de l'appareil de façon à réaliser une flamme dont les produits de combustion, portés à haute température, serviront de moyen de chauffage.

Pour l'alimentation d'un tel brûleur au moyen de gaz provenant d'une canalisation de gaz de ville à faible pression (50 à 200 mm. d'eau), Bunsen, le premier, a proposé la solution qui consiste à injecter le gaz à travers un orifice de faible section ; la vitesse relativement grande acquise par ce gaz (plusieurs dizaines de mètres par seconde) lui permet d'entrainer avec lui l'air de combustion, admis par un orifice latéral (virole) de section réglable. Le mélange ainsi obtenu est enflammé à la sortie d'un tube cylindrique prolongeant l'injecteur et de longueur égale à une dizaine de fois le diamètre. Pour que la combustion se stabilise à la sortie de ce tube en dessinant un "cône bleu" coiffant le tube, il est nécessaire que la vitesse de sortie du mélange gazeux soit supérieure à la vitesse de propagation de la flamme, cette dernière tendant à rentrer à l'intérieur du tube. Dans le brûleur Bunsen, si l'on accroit progressivement la quantité d'air admise, la vitesse de propagation tend à augmenter et, à un moment donné, la flamme rentre et vient se fixer sur l'injecteur. En fait, on est limité, par cette "prise à l'injecteur", à des mélanges contenant environ moitié de l'air théorique ; de ce fait, la

température de la flamme reste inférieure de 300 à 400° à celle correspondant au mélange théorique.

Méker a eu l'idée de coiffer le sommet du brûleur d'un cloisonnage en nickel qui a pour effet de gêner la rentrée de la flamme et de permettre d'atteindre sans difficulté la combustion théorique (fig. 24). La zone de combustion, au lieu d'affecter la forme d'un cône unique, est faite d'un grand nombre de petits cônes, de faible hauteur, présentant l'aspect d'une surface bleuâtre, dont la température est très sensiblement égale à la température théorique de combustion.



a) Droit non soufflé

b) Droit soufflé à haute pression

c) Droit soufflé à basse pression

Fig. 24. - Divers types de brûleurs Méker

Les brûleurs que nous venons de décrire fonctionnent directement sur le réseau de distribution du gaz à faible pression ; il est possible de réaliser des brûleurs (fig. 24 a et c) adaptés à l'emploi de gaz ou d'air comprimés au moyen de surpresseurs que nous ne décrirons pas ici ; de tels brûleurs (brûleurs soufflés) permettent, pour une même dimension, des débits calorifiques nettement plus élevés. On a donné à ces brûleurs des formes extrêmement variées, de façon à les adapter au chauffage de fours très divers (brûleurs coudés à 90°, etc.).

Chalumeaux. - Bien que les chalumeaux ne se différencient pas, dans leur principe, des brûleurs précédents, leur réalisation prend des formes nettement différentes, suivant le but auquel on les destine.

Dans le chalumeau pour soufflage du verre (fig. 25) alimenté en gaz sur la canalisation normale de distribution, on accroit le débit calorifique en envoyant de l'air surpressé (1) dans un tube

(1) Au moyen d'une soufflerie à pied, à écoulement d'eau, ou en provenance d'une canalisation d'air comprimé.

effilé faisant fonction d'injecteur ; le gaz est entrainé par le courant d'air en donnant une flamme dont on règle les caractéristiques (dimensions et composition) en agissant sur des robinets fixant les débits respectifs d'air et de gaz.

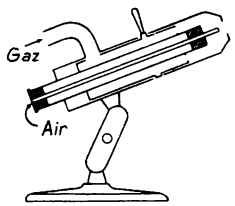


Fig. 25. - Chalumeau pour soufflage du verre.

Sur un principe très voisin est également réalisé le petit chalumeau à bouche utilisé en analyse chimique minérale ; l'opérateur se borne ici à souffler dans un tube effilé de façon à produire, en dehors et au voisinage de la flamme d'une bougie par exemple, un jet gazeux, lequel entraine l'air atmosphérique et l'envoie au sein de la flamme ; de cette flamme sort, du côté opposé, un dard à température relativement élevée résultant de la combustion totale des gaz réducteurs contenus à son intérieur.

Quant aux chalumeaux "de soudure", qu'il s'agisse d'appareils minuscules utilisés par la joaillerie et qui débitent quelques litres seulement à l'heure, ou des appareils débitant plusieurs mètres cubes à l'heure et susceptibles de découper des plaques de blindage atteignant 1 mètre d'épaisseur et plus, la réalisation en est très simple. Ici le gaz (acétylène, hydrogène, gaz de ville) ainsi que l'oxygène, sont fournis par des bouteilles à forte pression munies de détendeurs ; des robinets permettent de régler le débit de chacun de gaz ; le mélange intime de ces derniers s'opère dans un conduit commun de longueur suffisante. Leur combustion produite à la sortie d'un orifice (buse), fournit un cône bleu très allongé (dard) prolongé par les produits de combustion à température élevée (panache) ; à l'extrémité d'un même chalumeau peuvent être vissées des buses différentes, de façon à réaliser toute une gamme de flammes graduées en puissance. On trouvera au tableau VI les températures réalisables dans de telles flammes.

FOURS A GAZ

Généralités. - Dans un four électrique, du type à résistance par exemple (fig. 5) toute la chaleur Q dégagée par effet Joule dans la résistance par unité de temps est utilisée à compenser les pertes par les parois du four, de sorte que si λ est la conductibilité calorifique de la paroi, e son épaisseur, S sa surface, la température de régime T prise par le four est telle que $q = \frac{\lambda S}{e} T$.

Dans le cas du chauffage d'un four au moyen d'un combustible gazeux, les choses se passent différemment ; toute la chaleur Q_i disponible dans le combustible n'est pas utilisée dans le four car les gaz sortant du four emportent avec eux une partie de ces calories ; si T_c est la température de combustion du mélange combustible, T la température de régime prise par le four, on peut admettre de façon approchée que les fumées sortent à la température T ; dès lors, la chaleur laissée dans le four par le com-

bustible dans l'unité de temps (1) est $Q_i \frac{T_c - T}{T_c}$ et on doit l'égaler, comme plus haut, à la chaleur perdue par les parois :

$$Q_i \frac{T_c - T}{T_c} = \frac{\lambda S}{e} T$$

De cette équation, on déduit aisément, en posant $\frac{Q_i}{\frac{\lambda S}{e} T_c} = a$

$$\frac{T}{T_c} = \frac{a}{1 + a}$$

Pour un four donné, si l'on accroit Q_i en augmentant le débit de gaz combustible, le rapport $\frac{T}{T_c}$ croit à partir de zéro pour tendre asymptotiquement vers 1 ; pour $a = 1, \frac{T}{T_c} = \frac{1}{2}$; pour $a = 3, \frac{T}{T_c} = 3/4$.

Envisageons le cas concret d'un four de forme grossièrement sphérique, de diamètre 20 cm. $S = 1.200\ cm^2$, dont les parois en silico-alumineux ont une épaisseur e = 10 cm. (2) et que l'on se propose de chauffer au gaz de ville (pouvoir calorifique inférieur : 4.200 kcal/m^3; T = 1.950°).

Si l'on brûle 1 m^3 de gaz à l'heure dans un tel four, la valeur correspondante de a est : $\frac{4.200 \times 1.000}{\frac{0,02}{4} \cdot \frac{0.200}{10} \cdot 1950 \times 3.600}$, c'est-à-dire approximativement 1. Autrement dit, un débit de 1 m^3/heure de gaz dans le four donnera une température de régime voisine de $\frac{T_c}{2}$ c'est-à-dire sensiblement 1.000° ; un débit trois fois plus élevé (3 m^3/h.) donnerait une température voisine de 1.500°.

De tels chiffres ne sont qu'approchés et évidemment par excès ; nous avons en effet supposé que les fumées sortaient à la température T ; physiquement, il ne peut évidemment en être ainsi et tout l'art de constructeur consiste à accroître le plus possible les échanges colorifiques entre fluide chaud et paroi (3) de façon à atteindre au maximum ce résultat.

Les calculs précédents ont toutefois l'intérêt de mettre en relief le rôle joué par la température de combustion ; par exemple, une simple addition de quelques % d'oxygène dans l'air d'alimentation d'un four suffit à élever notablement sa température, De même, un préchauffage de l'air de combustion accroît beaucoup la température de combustion et permet, en conséquence, d'élever commodément la température de régime d'un four ; nous y reviendrons dans le prochain paragraphe.

(1) Nous supposons qu'en première approximation la chaleur spécifique des fumées est indépendante de T.

(2) Conductibilité calorifique = $\frac{0,02}{4}$ cgs (voir tableau I).

(3) En augmentant la surface de contact et la vitesse de circulation des fumées.

Dans les grands fours industriels, on n'utilise qu'exceptionnellement les flammes à mélanges préalables ; pour accroître l'uniformité de température dans le four, on est amené à étendre la combustion sur toute sa longueur en réalisant la diffusion progressive du gaz combustible dans l'air comburant, par un écoulement des deux gaz en nappes sensiblement parallèles. Une telle technique conviendrait moins pour des fours de laboratoire ; toutefois, dans certains modèles, on est amené à ne mélanger au gaz du brûleur qu'une partie de l'air de combustion (air primaire), le complément (air secondaire) étant amené dans le four sur le trajet des gaz partiellement brûlés.

Signalons enfin une dernière particularité présentée par certains types de fours. Si, dans un brûleur surpressé, on accroit beaucoup le débit du mélange combustible, la flamme finit par être projetée en avant du bec du brûleur et par s'éteindre. On peut stabiliser cette flamme en la fixant sur un lit de matériaux réfractaires placé à une certaine distance du brûleur (surface de combustion) ; ce lit réfractaire est porté à haute température et rayonne ses calories vers le laboratoire du four, soit directement, soit par l'intermédiaire de la voûte. Il semble bien que, dans une telle combustion, le lit refractaire n'ait pas le rôle de "catalyseur de combustion" que lui ont prêté certains auteurs ; il apparait bien également que les parois réfractaires d'un four quelle que soit leur nature, ne jouent pas davantage ce rôle de catalyseur, comme l'indiquent certains catalogues de constructeurs étrangers.

Récupération des calories des fumées.- Comme nous venons de le voir, le préchauffage d'un mélange combustible avant sa combustion dans un brûleur ne présente pas seulement l'avantage de donner un meilleur rendement calorifique, mais il permet, avec un combustible donné, d'élever de façon notable la température qu'est susceptible d'atteindre le four. Aussi les constructeurs se sont-ils appliqués à réaliser au mieux la récupération des calories emportées par les fumées et à utiliser ces calories au préchauffage de l'air de combustion.

Les récupérateurs "à inversion" utilisés dans l'industrie ne sont pas, jusqu'ici, entrés dans la pratique du laboratoire ; on leur préfère les récupérateurs "continus" dans lesquels les fumées et les gaz à réchauffer circulent de part et d'autre d'une paroi métallique, à travers laquelle ils échangent leurs calories ; la circulation des deux fluides se fait "à contre courant", c'est-à-dire que le fluide à réchauffer arrive au voisinage du point de sortie du fluide chaud, et sort dans la région d'entrée de ce même fluide.

Précisons les ordres de grandeur pour le cas concret d'un four utilisant le gaz de ville, réalisant 1.500° sans préchauffage, et dont nous utiliserons la chaleur sensible des fumées à préchauffer l'air de combustion. L'échange de chaleur de fluide à fluide ne peut se faire en chaque point qu'à la faveur d'une différence de température entre eux ; si l'on ne veut pas accroitre démesurément la surface de l'échangeur, il est nécessaire d'admettre pour cette différence une valeur que nous prendrons voi-

sine de 300° (1). Comme les fumées et l'air ont des capacités calorifiques peu différentes (2), il résulte de la loi de conservation de la quantité de chaleur que la chaleur perdue par les fumées (1.500 à 300°) doit se retrouver dans l'air à préchauffer, lequel dès lors s'échauffera de 0 à 1.200°. En réalité, du fait des déperditions calorifiques au cours du trajet des gaz, il est raisonnable d'admettre une température de préchauffage voisine de 1.000° ; notons d'ailleurs que la limite d'utilisation actuelle des aciers inoxydables employés dans les échangeurs ne dépasse pas cette température. Un tel préchauffage porte la température de combustion du gaz de ville à 2.380° (au lieu de 1.950°) (tableau VI) il en résulte une augmentation de température de régime du four que l'on peut estimer de l'ordre de 200°.

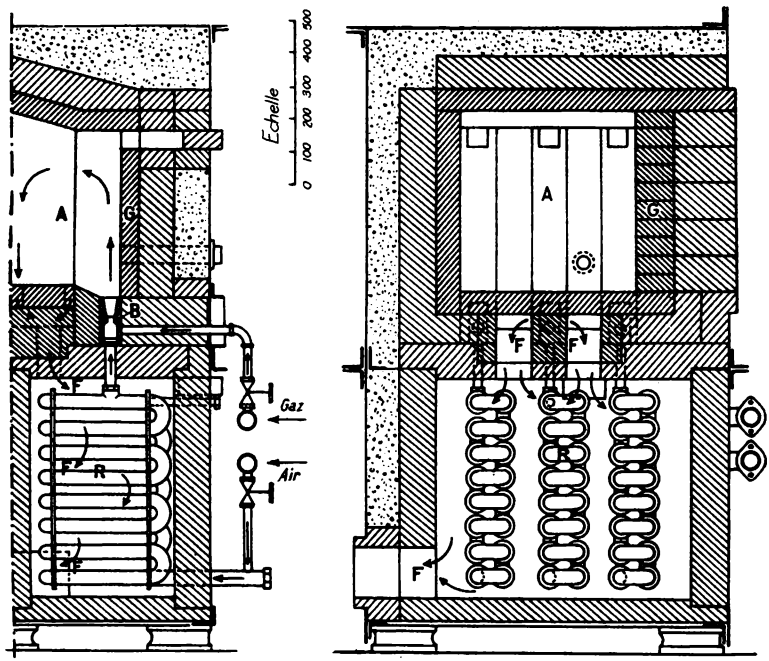


Fig. 26. - Four de grand volume avec récupération.

A. Laboratoire du four.
B. Brûleur réfractaire.
F. Fumées.
G. Garnissage réfractaire.
R. Récupérateur.

Dans les brûleurs destinés à utiliser l'air préchauffé à 1.000°, il est impossible de réaliser un mélange préalable avec le gaz combustible ; le mélange atteindrait en effet une température supérieure à la température d'inflammation spontanée. La combustion doit ici s'opérer par diffusion, par exemple dans un brûleur B à parois réfractaires ayant la forme d'un cône divergent (fig. 26) ; la flamme se fixe alors dans la zone de moindre

(1) Un tel calcul n'a aucune prétention à la rigueur.

(2) En gros dans le rapport de 5 à 4.

vitesse d'écoulement, c'est-à-dire au voisinage de la sortie du divergent.

Températures réalisables.- Il nous parait utile de donner les ordres de grandeur des températures que l'on est en mesure d'atteindre au laboratoire avec du gaz de ville courant. Si l'on utilise des brûleurs alimentés sous la pression normale de distribution, la température atteinte dépasse difficilement 1.400 à 1.450°, du moins avec des parois réfractaires d'épaisseur normale. Les brûleurs à air et gaz surpressés fournissent des températures de l'ordre de 1.650° à 1.700° (1) ; l'adjonction à l'air de quelques % d'oxygène permet d'atteindre et de dépasser 1.900°. L'usage d'oxygène à peu près pur comme comburant réalise aisément des températures de l'ordre de 2.300 à 2.500°.

Bien entendu, au delà de 1.800° se pose la question des réfractaires spéciaux (alumine, magnésie, zircone, thorine) à utiliser pour le garnissage de la paroi intérieure du four.

En ce qui concerne la récupération, avec des récupérateurs de très grande surface et par suite très encombrants, le gaz de ville surpressé peut fournir des températures de fours dépassant largement 2.100°. En pratique, avec des dimensions raisonnables adoptées pour les récupérateurs (2) on peut atteindre aisément 1.900°.

On fait assez couramment aux fours à gaz le reproche de ne pas fournir une souplesse suffisante dans le réglage de la température et de fatiguer beaucoup les réfractaires. A la vérité, la mise en régime d'un four suivant un rythme déterminé nécessite quelque pratique, mais ne comporte aucune difficulté vraiment sérieuse. Il importe évidemment de limiter l'arrivée de gaz au début du chauffage, de n'admettre l'air que progressivement et ensuite de faire croitre judicieusement le volume du mélange combustible admis dans le four.

Description de quelques fours à gaz.- Il ne peut être question de décrire ici les multiples modèles de fours à gaz qui ont vu le jour (3) ; nous nous bornerons à reproduire les caractéristiques essentielles de quelques-uns d'entre eux, choisis de façon à jalonner les étapes vers la réalisation de températures croissantes. Nous nous contenterons également de préciser les modèles de fours dans lesquels on se propose de porter un creuset à haute température ; pour des fours à tube ou à moufle de profils variés le principe resterait évidemment le même.

Pour des températures relativement basses et si l'on ne recherche pas un très bon rendement calorifique, le four sera simplement constitué par un brûleur vertical à mélange préalable coiffé d'une simple enveloppe réfractaire au milieu de laquelle se trouve placé le creuset à chauffer ; l'évacuation des gaz brûlés peut être activée par une cheminée faite d'un cylindre de tôle de

(1) De tels brûleurs ne modifient pas la température de combustion ; ils permettent simplement d'accroître le débit calorifique du four.

(2) De l'ordre des dimensions du four.

(3) Se reporter aux notices des constructeurs.

quelques dizaines de centimètres de hauteur et traversant le couvercle réfractaire du four. Le brûleur peut être à gaz et air soufflés ; les parois réfractaires seront, bien entendu, adaptées à la température à atteindre.

De tels fours, sous cette forme simplifiée à l'extrême, ne peuvent prétendre à fournir le maximum de rendement calorifique ni la température limite réalisable avec un combustible donné ; cela tient évidemment à la surface et à la durée insuffisantes de contact entre gaz chauds et parois, entrainant une température de sortie des gaz nettement plus élevée que la température de ré-

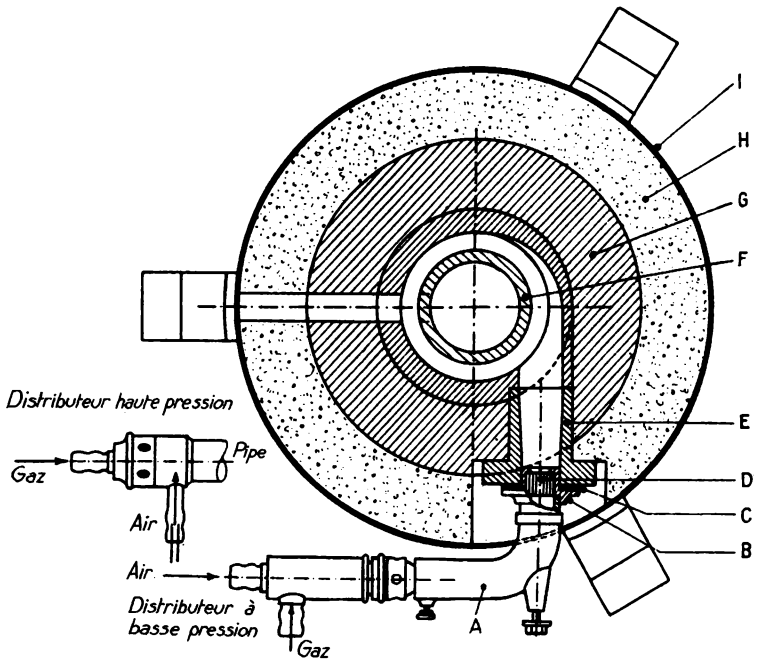


Fig. 27.- Four à creuset avec brûleur horizontal (Méker, constructeur).

A. Brûleur pipe.
B. Tête à vis nickel-chrome.
C. Rondelle amiante.
D. Cloisonnage.
E. Pièce réfractaire spéciale.
F. Creuset.
G. Réfractaire.
H. Calorifuge.
I. Enveloppe en tôle.

gime du four. On est tout naturellement amené à accroître la durée de séjour des gaz en plaçant le brûleur, non verticalement, mais horizontalement, de façon que les gaz arrivent tangentiellement à la paroi, et s'écoulent en dessinant autour du creuset une spirale s'achevant dans le conduit d'évacuation (fig. 27) ; pour les grandes dimensions de fours, on pourra disposer plusieurs brûleurs analogues répartis régulièrement sur le pourtour de l'enceinte. On a grand avantage également à prévoir une disposition amenant les gaz brûlés à circuler à l'extérieur d'une première enveloppe entourant le creuset et à s'écouler vers le bas du four. Enfin, diverses dispositions ont été adoptées pour per-

mettre la récupération de la chaleur emportée par les fumées ; nous en décrirons deux seulement.

Une première réalisation, déjà très ancienne (four Bigot), est reproduite figure 28 ; elle utilise du gaz de ville à la pression normale de distribution. Le gaz arrivant par une couronne A est amené au four à travers des brûleurs B, munis d'une virole d'admission d'air primaire ; les gaz brûlés (flèches en traits pleins) s'écoulent entre le creuset G et une enveloppe F et s'échappent à travers un support ajouré E pour aller au récupérateur R formé d'un double cylindre, dans la partie extérieure duquel est admis l'air secondaire de combustion (flèches en pointillé).

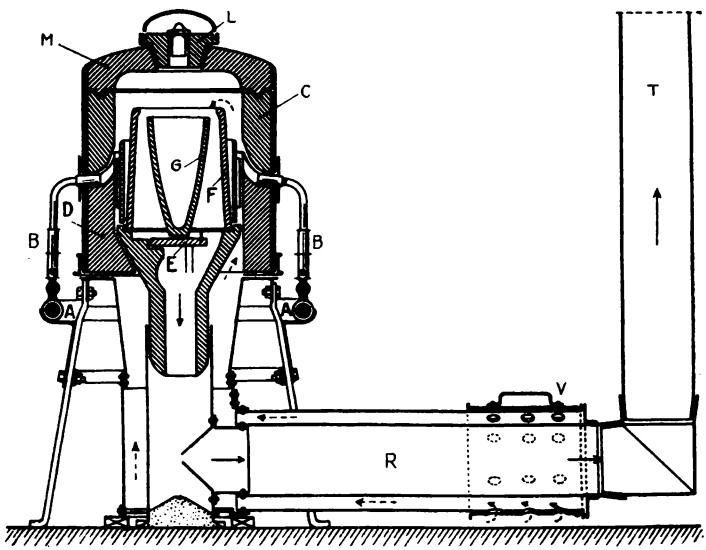


Fig. 28.- Four Bigot.

Les flèches en trait plein représentent les gaz brûlés.
Les flèches en trait pointillé représentent l'air secondaire réchauffé.

A, Couronne de distribution du gaz.
B. Brûleurs.
CD. Paroi refractaire.
E. Support ajouré.
F. Enveloppe réfractaire entourant le creuset.
ML. Couvercles
R. Récupérateur.
T. Conduit de tirage.
V. Virole d'admission de l'air à préchauffer.

Jusqu'à 1.100°, on marche avec l'air primaire seul (viroles B ouvertes, V fermées) ; au-dessus de 1.100°, on ferme les viroles A et l'on admet l'air secondaire en ouvrant plus ou moins la virole V. Cet air, après réchauffage, arrive dans la zone d'admission du gaz où la combustion s'opère par diffusion.

Avec des creusets de contenance 2 à 4 litres (pièces F : 210 x 260 mm.) et une pression d'alimentation en gaz assez faible (40 à 50 mm. d'eau), la température de régime du four atteint facilement 1.550°.

Une autre réalisation, portant sur des volumes nettement plus élevés (100 à 150 litres) (1) et permettant d'atteindre 1.850° avec alimentation en air et en gaz de ville surpressés, est donnée par la figure 26. Le gaz arrive latéralement dans un brûleur B en forme de convergent divergent : l'air réchauffé est admis à la partie inférieure et la combustion s'opère dans la partie divergente. Après leur trajet dans le laboratoire du four, les fumées F traversent un récupérateur tubulaire R en acier inoxydable, au sein duquel circule l'air à préchauffer. La surface de ce récupérateur est suffisante pour porter l'air à 1.000°, les fumées sortant à 300°.

La figure 29 reproduit un four réalisé au Laboratoire des Hautes Températures pour l'obtention de températures de l'ordre de 2.400° par combustion de gaz de ville et oxygène. La seule difficulté tient à la nécessité d'utiliser des pièces réfractaires ou des garnissages spéciaux (zircone, thorine) supportant ces températures (2).

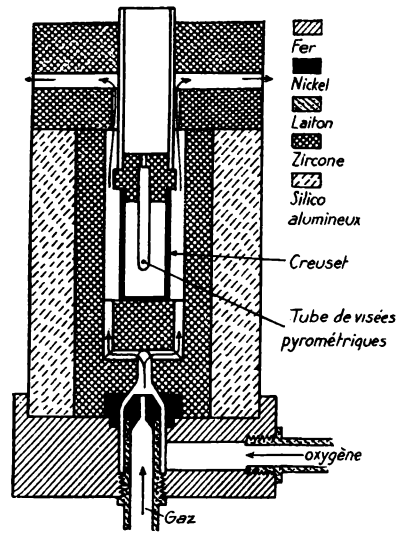


Fig. 29.- Four à gaz oxygène.

CHALUMEAU A HYDROGÈNE ATOMIQUE

A haute température, l'hydrogène moléculaire se dissocie en deux atomes, cette dissociation absorbant 115.000 calories par molécule-gramme. Inversement, si, ayant produit des atomes d'hydrogène, on les amène sur une surface froide, ces atomes vont s'y recombiner en libérant l'énergie qui avait servi à les produire. A partir de ce principe, Langmuir a imaginé le chalumeau à hydrogène atomique, dont le schéma est reproduit figure 30. Autour de deux tiges de tungstène (de diamètre 4 à 6 mm. dans les réalisations industrielles, de 1 à 2 mm. dans une réalisation de laboratoire), on fait circuler un courant d'hydrogène ; grâce à une source de courant à tension convenable, on amorce entre ces deux tiges un arc dont le rôle est d'amener l'hydrogène moléculaire à haute température et de le dissocier partiellement (3), si aucun corps solide n'est placé dans la veine, les atomes

(1) Le même dispositif général s'appliquerait bien entendu à des volumes plus réduits et a des températures plus élevées.

(2) La figure donne la disposition adoptée pour la mesure optique des températures au sein d'un métal en fusion.

(3) Dans cette zone (dard) on observe une coloration rouge due à la présence des raies classiques d'émission de l'hydrogène (H^{α} H^{β} H^{γ}).

d'hydrogène finissent par se recombiner et brûler au contact de l'air extérieur en dessinant une zone d'assez grandes dimensions (panache).

A la sortie de l'arc, la concentration en atomes d'hydrogène est suffisante pour porter le tungstène à la fusion (3.400°) ; à quelque distance, il est encore possible de fondre le molybdène (2.600°) (1). L'atmosphère d'un tel chalumeau est essentiellement réductrice, condition favorable à la fusion des métaux facilement oxydables.

Pour des opérations industrielles de soudure, on réalise des postes consommant plusieurs dizaines et centaines de kilowatts et alimentés en courant alternatif. Au laboratoire, on peut improviser soi-même un montage analogue à celui reproduit sur la figure 30, alimenté par une source de courant continu de tension égale ou supérieure à 110 volts. Le diamètre des buses d'amenée de l'hydrogène dans l'arc est de l'ordre de 3,5 mm. : leur angle est d'environ 30°, la distance entre les pointes de tungstène est réglée à environ 1mm. Un rhéostat placé entre la source et l'arc permet de régler à 30 ampères environ la valeur du courant dans l'arc.

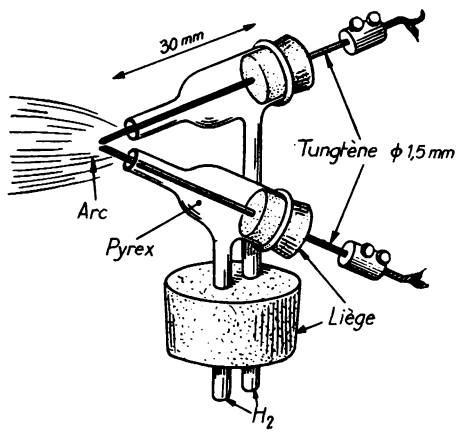


Fig. 30. - Chalumeau à hydrogène atomique pour l'usage au laboratoire.

Pour la mise en marche de l'appareil, on envoie d'abord l'hydrogène dans les buses ; on l'enflamme et on règle à 25 ou 30 cm. la longueur de la flamme. On amorce ensuite l'arc en court-circuitant les électrodes au moyen d'une tige de graphite (diamètre 3 mm.)

Torche électronique. - Dans ces dernières années, on a pu réaliser sous une forme pratique un nouveau moyen de production de hautes températures appelé torche électronique, dont l'aspect rappelle celui d'un chalumeau.

Un magnétron, alimenté sous une tension continue de l'ordre de 2.000 à 3.000 volts, fournit des ondes d'hyperfréquences (10^8 à 10^9 hz), qui produisent entre deux parties du chalumeau (électrode centrale refroidie et électrode extérieure enveloppant la première) une tension haute fréquence de l'ordre de 2.000 volts. Dans l'espace entre les deux électrodes, on fait circuler un gaz

(1) Le comportement d'un tel "chalumeau" est essentiellement différent de celui d'un chalumeau à flamme. La température du gaz est ici relativement basse (2.000 à 2.300°) ; c'est la réaction de recombinaison des atomes à la surface du métal qui amène son élévation de température.

(air, O_2, N_2, CO_2) qui, dans l'orifice de sortie, se trouve porté à des températures atteignant 3.000 à 3.700°C. (1)

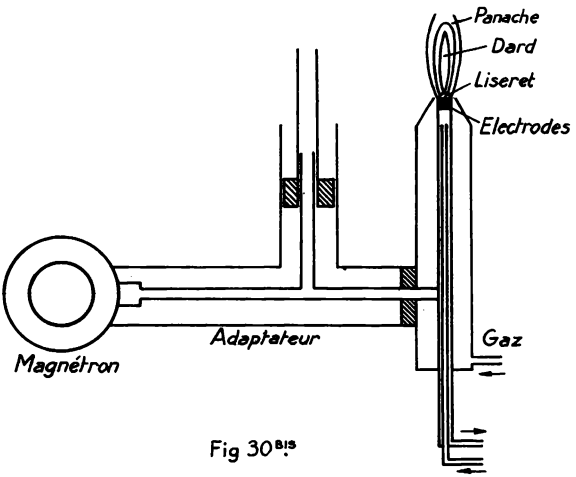


Fig 30bis

MESURE DES TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

Notre intention n'est pas de donner ici une description quelque peu complète des divers procédés de mesure des hautes températures ; nous nous bornerons à indiquer les techniques les plus courantes, en insistant plus particulièrement sur les difficultés et les causes d'erreur rencontrées dans leur mise en oeuvre.

Parmi les nombreux appareils proposés pour la mesure des hautes températures, seuls le couple thermoélectrique et le pyromètre optique à disparition de filament sont susceptibles de s'adapter aux déterminations courantes rencontrées au laboratoire. Le premier de ces appareils reste, en fait, limité aux températures ne dépassant pas 1.500°, le second couvre toute la gamme des températures dépassant pratiquement 1.000°.

COUPLES THERMOÉLECTRIQUES

Divers couples utilisés.- La figure 31 reproduit les valeurs des forces électromotrices (f.e.m.) thermoélectriques fournies par divers couples ; ces valeurs sont rapportées au platine comme métal de référence.

(1) Voir la communication de M. LAROCHE au Colloque sur la chimie des hautes températures. C.N.R.S. mai 1954.

TABLEAU VII.- TEMPÉRATURES REPÈRES

(Les valeurs soulignées sont celles des points fixes internationaux)

Corps	Températures (°C)	Corps	Températures (°C)
Fusion de la glace	0,00	Solidification de l'aluminium	660,0
Ebullition de l'eau ..... t = 100,00 + 0,037 (p-760)	100,00	- KCI	770,3
		- NaCI	800,4
Condensation de la vapeur de naphtaline..... t = 218,0 + 0,058 (p-760)	218,0	- SO_4Na_2.....	884,7
		- l'or.....	1.063,0
		- SO_4K_2.....	1.069
Solidification de l'étain	231,85	- cuivre	1.083
Condensation de la vapeur de benzophénone ..... t = 305,9 + 0,063 (p-760)	305,9	- nickel	1.455
		- palladium ..	1.555
		- platine.....	1.773
Solidification du plomb.....	327,3	- rhodium ...	1.966
Solidification du zinc	419,45	- iridium	2.454
Ebullition du soufre ..... t = 444,60 + 0,091 (p-760)	444,60	Fusion du molybdène.....	2.620
Solidification de l'antimoine.	630,5	- tungstène.....	3.380

TABLEAU VIII.- FORCES ÉLECTROMOTRICES DU COUPLE Pt-PtRh (à 10 % Rh)

Degrés C	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
0	0	0,06	0,11	0,17	0,24	0,30	0,36	0,43	0,50	0,57
100	0,64	0,72	0,79	0,87	0,95	1,02	1,10	1,18	1,26	1,35
200	1,43	1,52	1,60	1,69	1,78	1,86	1,95	2,04	2,13	2,22
300	2,31	2,40	2,50	2,59	2,68	2,77	2,87	2,96	3,05	3,15
400	3,24	3,34	3,44	3,53	3,63	3,73	3,82	3,92	4,02	4,12
500	4,22	4,31	4,41	4,51	4,61	4,71	4,82	4,92	5,02	5,12
600	5,22	5,32	5,43	5,53	5,63	5,74	5,84	5,94	6,05	6,16
700	6,26	6,37	6,47	6,58	6,68	6,79	6,89	7,01	7,11	7,22
800	7,33	7,44	7,55	7,66	7,77	7,88	7,99	8,10	8,21	8,32
900	8,43	8,54	8,66	8,77	8,89	9,00	9,11	9,22	9,34	9,46
1.000	9,57	9,68	9,80	9,92	10,03	10,15	10,27	10,38	10,50	10,62
1.100	10,74	10,86	10,98	11,10	11,21	11,33	11,45	11,57	11,69	11,81
1.200	11,93	12,05	12,17	12,29	12,41	12,53	12,65	12,77	12,89	13,01
1.300	13,13	13,25	13,37	13,49	13,61	13,73	13,85	13,97	14,09	14,21
1.400	14,33	14,45	14,58	14,70	14,82	14,94	15,06	15,19	15,31	15,43
1.500	15,55	15,67	15,79	15,91	16,03	16,15	16,27	16,39	16,51	16,63
1.600	16,75	16,87	16,99	17,11	17,23	17,35	17,47	17,59	17,71	17,83
1.700	17,95	18,07	18,19	18,31	18,43	18,55	.....	.....	.....	.....

TABLEAU IX.- FORCES ÉLECTROMOTRICES EN MILLIVOLTS DES COUPLES BTE CTE

Degrés C	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
0		0,58	1,16	1,75	2,40	3,15	3,72	4,41	5,04	5,67
100	6,30	6,95	7,60	8,30	9,00	9,75	10,60	11,50	12,40	13,20
200	14,00	14,80	15,60	16,40	17,25	18,10	18,80	19,60	20,40	21,20
300	22,10	22,90	23,70	24,60	25,40	26,30	27,10	27,90	28,80	29,60
400	30,50	31,30	32,20	33,10	34,00	34,85	35,75	36,60	37,50	38,40
500	39,20	40,10	41,00	41,80	42,70	43,60	44,40	45,20	46,30	47,20
600	48,10	49,00	49,90	50,75	51,60	52,50	53,40	54,30	55,20	56,10
700	57,00									

TABLEAU X.- FORCES ÉLECTROMOTRICES EN MILLIVOLTS DES COUPLES CHROME-NICKEL (BTE, CHROMEL) - ALUMINIUM-NICKEL (ATE, ALUMEL)

Degrés C	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
0	0	0,41	0,82	1,23	1,65	2,07	2,48	2,90	3,32	3,73
100	4,15	4,56	4,98	5,39	5,79	6,19	6,59	6,99	7,39	7,79
200	8,19	8,60	9,00	9,41	9,82	10,23	10,64	11,05	11,46	11,87
300	12,29	12,70	13,12	13,54	13,96	14,38	14,79	15,21	15,63	16,06
400	16,48	16,91	17,33	17,75	18,18	18,60	19,03	19,45	19,88	20,31
500	20,74	21,17	21,59	22,02	22,44	22,87	23,30	23,73	24,15	24,58
600	25,00	25,42	25,85	26,27	26,69	27,12	27,55	27,96	28,37	28,79
700	29,21	29,62	30,03	30,44	30,85	31,26	31,66	32,07	32,47	32,88
800	33,28	33,68	34,08	34,48	34,88	35,27	35,66	36,06	36,46	36,85
900	37,25	37,64	38,04	38,43	38,82	39,21	39,60	39,98	40,37	40,81
1.000	41,13	41,51	41,89	42,26	42,64	43,01	43,38	43,75	44,12	44,48
1.100	44,85	45,21	45,57	45,93	46,29	46,29	46,65	47,01	47,71	48,07

L'alliage platine-rhodium à 10 % de rhodium associé au platine (couple Le Châtelier) fournit une f.é.m. d'environ 10 microvolts par degré ; il permet d'atteindre 1.300° pour des mesures très précises ; vers 1.500°, son évolution rapide oblige à vérifier souvent son étalonnage. L'industrie livre actuellement des couples dont l'interchangeabilité est garantie à 2 ou 3° près au voisinage de 1.000° (Tableau VIII).

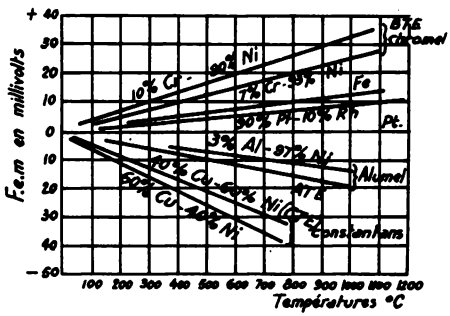


Fig. 31.- Forces électro-motrices des couples usels.

Lorsqu'on recherche des f.é.m. nettement plus élevées, on utilise un couple fait d'un fil positif en alliage nickel-chrome (BTE d'Imphy, chromel) et d'un fil négatif en constantan (CTE Imphy) ; un tel couple, utilisable jusqu'à 750°, fournit une f.é.m. variant presque linéairement et dépassant 70 microvolts par degré.

Le remplacement du fil négatif en constantan par un alliage aluminium-nickel (ATE Imphy, alumel), moins oxydable que le constantan, fournit une f.é.m. moins élevée (40 microvolts par degré), mais permet d'atteindre 1.000°.

Millivoltmètre.- La mesure des f.é.m. fournies par de tels couples peut s'effectuer de façon très simple au moyen d'un millivoltmètre portatif, à pivots ou à suspension par fil et spot lumineux. Si les fils du couple sont suffisamment longs, on peut se contenter de les relier directement aux bornes de l'appareil, la soudure des deux fils étant placée dans l'enceinte à haute température. Dans ce cas, la différence de potentiel lue sur l'instrument mesure la différence entre la f.é.m. du couple à la température t de l'enceinte et sa f.é.m. à la température des bornes du millivoltmètre, c'est-à-dire la température ambiante . Comme la force électromotrice ne varie pas nécessairement de façon linéaire avec la température, il n'est pas rigoureux d'ajouter, à la lecture de l'instrument, supposée faite en degrés, la valeur de la température ambiante. Pour le couple Pt - PtRh par exemple, la correction à ajouter est égale à la température ambiante multipliée par un coefficient qui varie linéairement de 0,60 à 0,45 lorsqu'on passe de 300° à 1.500°.

Chaque fois qu'on le pourra, il sera préférable de relier les deux extrémités libres du couple à des fils de cuivre, les points de jonction (soudures froides) étant plongés dans la glace fondante (fig. 32).

L'emploi d'un millivoltmètre comme instrument de mesures ne peut prétendre à une très grande précision ; l'erreur de lecture couramment admise dans un tel appareil est de l'ordre de 1/200, elle correspond environ à 5° au voisinage de 1.000°. Il est nécessaire, en outre, d'attirer l'attention sur le fait que certains millivoltmètres ont une résistance intérieure trop fai-

ble, ce qui peut entrainer des erreurs de mesure très notables, du moins lorsqu'on les utilise avec des couples dont la résistance est assez grande (couples au platine rhodié en particulier).

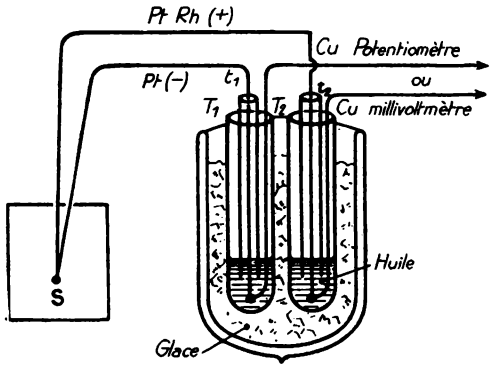


Fig. 32.- Utilisation d'un bain de glace pour définir la température des soudures froides

En réalité, le millivoltmètre est un appareil dont la déviation est proportionnelle au courant i qui le traverse ; si e est la force électromotrice à mesurer, R_c la résistance du couple et fils de jonction, R_m celle de l'appareil, le courant i a pour valeur : $i = \frac{e}{R_c + R_m}$; l'indication inscrite sur la graduation de l'instrument est en réalité le produit de i par la résistance R_m, de sorte que la lecture E faite sur l'instrument n'est pas égale à e, mais à $\frac{eR_m}{R_c + R_m}$. L'instrument, gradué en millivolts, ne donne une valeur correcte de la f.é.m. du couple que si la résistance intérieure R_m est très grande par rapport à celle du couple.

On peut, évidemment, étalonner l'instrument en températures, avec le couple qui doit lui être associé, mais on s'interdit alors de changer les dimensions du couple ; et même, comme l'a fait remarquer Le Châtelier, on s'expose encore à des causes d'erreur qui tiennent au changement de résistance du couple lorsqu'on l'enfonce plus ou moins dans l'enceinte à mesurer (1).

Potentiomètre.- La mesure de la f. é. m. du couple au moyen d'un potentiomètre est totalement à l'abri des causes d'erreur que nous venons de signaler, aussi doit-on l'adopter chaque fois que l'on recherche quelque précision. Nous rappelons brièvement le principe d'une telle mesure (fig. 33).

Le circuit potentiométrique ABOC comporte un accumulateur A, un rhéostat Rh pour le réglage du courant potentiométrique i, une résistance fixe OB et une résistance OC sur laquelle peut glisser un curseur M. Dans l'emploi de l'appareil, une première opération consiste à régler le courant potentiométrique à sa va-

(1) Un couple platine-platine rhodié de 0,4 mm. de diamètre et de longueur 1m. a une résistance qui varie de 1 à 4 ohms lorsqu'on passe de 0° à 1.000°. Les couples BTE CTE ne présentent pas cet inconvénient.

leur correcte ; pour arriver à ce résultat, on bascule l'interrupteur 1 sur la position ac, mettant ainsi en opposition la pile étalon W avec la différence de potentiel aux bornes OB (1) ; on agit ensuite sur le rhéostat Rh jusqu'à amener le galvanoscope G à marquer zéro.

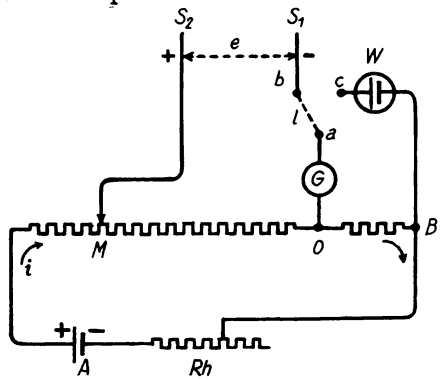


Fig. 33. - Schéma d'un potentiomètre.

Pour mesurer ensuite la f.é.m. aux bornes S_1S_2 du couple, on bascule l'interrupteur 1 sur la position ab et on règle le curseur M jusqu'à ce que le galvanoscope G marque zéro (2). La position de M fixe la valeur de la f.é.m. ; la résistance OC comporte en général une graduation en millivolts, elle peut également comporter la graduation en degrés correspondant à un couple de référence.

Pour les mesures au couple platine-platine rhodié, on devra disposer d'un potentiomètre allant jusqu'à 15 mV ; pour les mesures avec couples genre BTE-CTE, le potentiomètre devra permettre d'atteindre 60 mV.

La précision fournie par un tel montage est fixée par la sensibilité de l'appareil de zéro G (3) ; si cet appareil ne dévie de façon sensible que pour 10 μV, il est illusoire d'espérer une précision supérieure au degré avec un couple platine-platine rhodié.

Causes d'erreur dans les mesures au couple. - Avant de donner un aperçu des méthodes d'étalonnage d'un couple, il nous paraît indispensable de signaler les causes d'erreur que l'on peut rencontrer dans l'emploi d'un tel instrument. Ces erreurs tiennent aux échanges de chaleur avec l'extérieur, soit par conductibilité calorifique des fils du couple, soit par rayonnement ; nous allons les illustrer par quelques exemples.

Un couple plongé dans une enceinte, soit seul, soit à l'intérieur de son tube de protection, perd de la chaleur vers l'extérieur par conductibilité calorifique ; cette chaleur ne peut être fournie par l'enceinte qu'à la faveur d'une différence de température entre l'enceinte et le couple et, sans qu'il soit besoin de calculs, il est évident que cette différence sera d'autant plus marquée que les fils auront une plus forte section et qu'ils se-

---

(1) Certains potentiomètres n'ont pas de pile étalon Weston, mais un ampéremètre placé dans le circuit potentiométrique et comportant un trait de repère fixant la valeur de i ; une telle disposition fournit une précision nettement moins bonne.

(2) Dans certains potentiomètres, la résistance OC comporte plusieurs fractions individuellement graduées.

(3) Et aussi, bien entendu, par les soins apportés par le construoteur dans la graduation du potentiomètre.

ront immergés moins profondément dans l'enceinte. Un couple avec son tube de protection, immergé dans un bain de métal, peut, de ce fait, donner des valeurs fausses de plusieurs degrés si la profondeur d'enfoncement n'est pas suffisante (1) ; un excellent critérium consiste à s'assurer que les indications du couple restent bien constantes lorsqu'on modifie cette profondeur.

Dans le même ordre d'idées, si l'on effectue des mesures dans une enceinte à température non uniforme, il importe de disposer les fils du couple de façon qu'ils suivent, sur une longueur aussi grande que possible, une zone de température égale à celle que l'on se propose de mesurer. Si, par exemple, on veut évaluer la température en un point situé dans l'épaisseur de la paroi d'un four, le couple ne devra pas être disposé normalement à cette paroi, mais bien dans un plan parallèle. De même, pour la mesure de la température d'une surface, on disposera le couple sous forme d'une spirale collée le long de cette surface.

Les erreurs dues au rayonnement s'introduisent, en particulier, lorsqu'on se propose de mesurer la température d'un gaz entouré d'une enceinte à température différente ; c'est par exemple le cas de la mesure de la température d'une flamme à l'air libre. Un fil quelconque, plongé dans cette flamme, s'échauffe et par suite, rayonne à l'extérieur ; cette chaleur rayonnée ne peut lui être fournie par les gaz de la flamme que si sa température est inférieure à celle des gaz. La différence est d'autant plus grande que le fil a un plus grand diamètre, un pouvoir émissif plus élevé et que le coefficient d'échange calorifique entre fil et gaz est plus faible. Pour une flamme Méker et un fil de platine de diamètre 0,3 à 0,4 mm., l'écart dépasse 200°. On trouvera ailleurs les diverses techniques employées pour corriger ces erreurs.

Il nous parait également utile de mettre en garde les chercheurs contre une grave cause d'erreur qui peut s'introduire si l'on plonge un couple au sein d'un mélange gazeux susceptible d'entrer en réaction ; les fils peuvent être le siège d'une réaction catalytique de surface qui élève leur température très notablement au-dessus de celle du gaz.

Tubes de protection. - Au laboratoire, on est amené le plus souvent à protéger le couple de mesures en entourant l'un des fils (ou les deux) d'un petit tube de porcelaine (diamètre intérieur 1 mm., diamètre extérieur 2 mm.) et en plongeant l'ensemble dans un tube protecteur, également en porcelaine de diamètre intérieur 4 à 6 mm., et fermé à son extrémité.

Dans le choix de ces tubes de protection, on sera guidé par les considérations suivantes ; si l'on veut protéger aussi complétement que possible le couple contre l'atmosphère du four, on utilisera une porcelaine peu perméable aux gaz, ou, si l'on ne

(1) Avec un couple Pt-PtRh de diamètre 0,3 à 0,4 mm. il faut utiliser des profondeurs d'au moins 10 cm. Dans une enceinte pleine de gaz, dans laquelle les échanges calorifiques sont moins intenses, cette profondeur doit être nettement plus élevée.

désire pas dépasser 1.000°, un tube d'acier inoxydable résistant mieux aux brusques variations de température.

Lorsque l'atmosphère du four est réductrice, un couple Pt-PtRh risque de se détériorer rapidement si le tube réfractaire renferme de la silice ; à haute température, les gaz du four amènent en effet une réduction de la silice et la formation de siliciures de platine extrêmement fusibles. Il convient, dans ce cas, d'utiliser des tubes de protection en alumine à peu près pure ; on pourra également réaliser autour du couple une atmosphère oxydante au moyen d'un courant d'oxygène entrant par le tube central et sortant entre ce tube et le tube extérieur.

Etalonnage des couples. - Lorsqu'il s'agit de couples Pt-PtRh et si l'on ne cherche pas une précision supérieure à celle que fournit un bon millivoltmètre, on peut se contenter de l'étalonnage donné par le fabricant (erreur ne dépassant pas 2 à 3°). On peut également comparer le couple à un couple repère, dont on possède l'étalonnage ; dans ce but, on utilise un four à résistance dans lequel on dispose au centre, bien symétriquement, un bloc conducteur de la chaleur (nickel ou graphite) percé de deux trous axiaux opposés, laissant entre eux une épaisseur de quelques millimètres, et dans lesquels on plonge les tubes de protection des deux couples à comparer.

On peut enfin effectuer un étalonnage complet en plongeant le couple, avec son tube de protection, dans un métal fondu au sein d'un creuset de graphite (1) de diamètre intérieur 2 cm., de hauteur 15 cm. La fusion s'opérera de préférence électriquement ; on notera la force électromotrice du couple pendant la solidification du métal. (Le tableau VII indique les températures repères).

Dans le cas du couple Pt-PtRh, une méthode simplifiée consiste à souder entre les branches du couple un fil d'or, de diamètre 0,3 à 0,5 mm. et de longueur 5 à 8 mm. ; le couple, avec son tube de protection, est plongé dans un bloc, conducteur de la chaleur, disposé à l'intérieur d'un four dont on élève lentement la température. Au moment de la fusion, on observe un palier qui peut durer plus d'une minute. La précision obtenue dans cet étalonnage atteint aisément un degré.

Pour la graduation d'un tel couple, on peut sans inconvénient se borner à l'étalonnage au point de fusion de l'or ; il se trouve, en effet, que les écarts de force électromotrice présentés par un couple par rapport au couple étalon sont proportionnels à la température. Dès lors, si le couple observé donne, par exemple, au point de fusion de l'or une f.é.m. 10.150 μV (au lieu de 10.300), l'écart à 500° sera sensiblement $\frac{150 \times 500}{1.063}$, c'est-à-dire environ 70 μV, ce qui correspond à une différence de 7°. Les erreurs commises dans une telle façon d'opérer ne dépassent certainement pas 1°. Les remarques précédentes ne s'appliquent pas aux couples genre nichrome-constantan, dont la reproductibilité et les écarts n'obéissent pas aux règles ci-dessus.

(1) Le graphite pur ne souille pas les métaux adoptés comme points fixes internationaux (Sb, Ag, Au).

PYROMÈTRE OPTIQUE

Les pyromètres optiques utilisant le rayonnement d'une source dont on veut déterminer la température sont de deux catégories ; 1° le pyromètre mono-chromatique, utilisant une partie étroite du spectre visible (extrême rouge en général) ; 2° le pyromètre à radiation totale, recevant tout le rayonnement de la source. Nous décrirons d'abord le premier, en nous limitant aux données pratiques essentielles.

PYROMÈTRE A DISPARITION DE FILAMENT

Parmi les divers types de pyromètres monochromatiques proposés, le modèle à disparition de filament s'est imposé pour diverses raisons ; simplicité de construction et d'emploi, précision, possibilité de mesurer la température d'échantillons de très faibles dimensions.

Cet appareil est constitué par une véritable lunette comportant, dans le plan de visée de l'oculaire O', un filament incandescent F dont on peut faire varier l'intensité au moyen d'un accumulateur A et d'un rhéostat C (fig. 34) ; un verre rouge placé en avant de l'oeil permet de recevoir uniquement la lumière rouge extrême du rayonnement de la source S et du filament F.

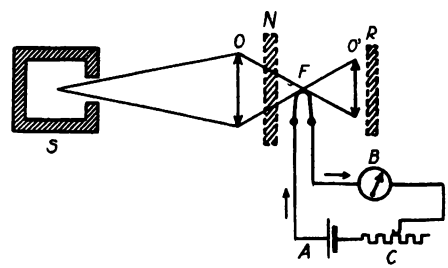


Fig. 34. - Schéma du pyromètre à disparition de filament.

En agissant sur le tirage de l'objectif O, on fait former l'image de la source sur le filament ; l'oeil perçoit alors cette image sur laquelle vient se profiler le filament (1).

La mesure consiste à agir sur le rhéostat C de façon à faire disparaitre le filament sur le fond lumineux de la source : en opérant à diverses températures, on peut tracer la courbe de T en fonction de i ; le plus souvent, l'ampéremètre porte directement la graduation en températures.

Pratiquement, si l'on ne veut pas user anormalement le filament tare, on est amené à ne pas dépasser 1.400 à 1.500° ; pour atteindre des températures plus élevées, on dispose en avant du filament un verre neutre N qui réduit l'intensité de la source S ; l'appareil porte alors une seconde graduation en températures correspondant à l'addition du verre absorbant.

Pour rendre l'appareil aussi portatif que possible, les constructeurs disposent, en général, sur la lunette, le rhéostat de réglage et l'ampèremètre gradué en températures ; certains

(1) En ajoutant une lentille en avant de O, on peut viser à de courtes distances et transformer l'appareil en micropyromètre.

d'entre eux logent même l'accumulateur dans le boitier de l'instrument. Pour des mesures un peu précises au laboratoire, cette façon de faire n'est pas pleinement souhaitable ; en particulier, l'ampéremètre monté sur l'instrument risque de n'être pas parfaitement équilibré et de fournir des indications qui dépendent de la position du pyromètre ; de plus, cet instrument, de dimensions trop faibles (1), ne peut fournir toute la précision que donne un bon ampèremètre disposé sur une plateforme stable.

Il faut signaler également que le constructeur, pour diminuer l'importance de la source électrique, est souvent amené à réduire le diamètre du filament (2), ce qui présente l'inconvénient de donner des disparitions beaucoup moins satisfaisantes et de limiter encore la précision.

Avec un instrument bien construit et un très bon ampèremètre, on peut atteindre la précision de 2° au voisinage de 1.000° et de 3 à 4° au voisinage de 1.600°. Si l'on veut accroitre cette précision, il est nécessaire de mesurer le courant tare au moyen d'un potentiomètre ; on peut alors atteindre une précision du demi-degré.

On peut faire au pyromètre précédent (à courant variable) le reproche d'utiliser une plage de mesures dont l'intensité varie dans de très grandes proportions lorsqu'on passe d'une extrêmité à l'autre de l'échelle. Pour éviter cet inconvénient, et aussi pour permettre une mesure portant sur une graduation plus étendue, on a proposé de maintenir fixe le courant tare et d'obtenir la disparition du filament grâce à un coin photométrique disposé en avant du filament ; à chaque position du coin correspond une température lue directement sur le tambour actionnant le coin (3)

Graduation de l'instrument.- Pour graduer un pyromètre à disparition de filament, il est nécessaire de réaliser une enceinte fermée, à température uniforme et connue ; on y pratique une petite ouverture sur laquelle on pointe l'instrument. Dans les laboratoires spécialisés, on utilise à cet effet un bain de métal (or, palladium, platine), au sein duquel est plongé un tube réfractaire mince, de grande longueur par rapport à son diamètre ; on pointe le pyromètre sur l'orifice du tube pendant la solidification du métal. (fig. 29).

Une telle technique est difficile à mettre en oeuvre dans un laboratoire courant. On peut la remplacer par la suivante relativement plus facile mais également moins sûre et qui suppose l'emploi d'un couple étalonné. Dans un four, on dispose un bloc conducteur percé symétriquement de deux trous axiaux ; dans l'un, on introduit le couple avec son tube protecteur, dans l'autre,

---

(1) Cet inconvénient est d'autant plus marqué que pratiquement, on n'utilise qu'environ la moitié de la longueur de l'échelle (les mesures ne sont pas possibles au-dessous de 800°).

(2) Filament de tungstène dans le vide, normalement de 0,05 mm. de diamètre.

(3) L'appareil ne nécessite que deux températures repères pour la graduation, laquelle est indépendante de la lampe tare utilisée.

on pointe le pyromètre à étalonner. Pour qu'une telle mesure soit sûre, il est nécessaire de stabiliser le four pendant un temps suffisamment long pour que l'équilibre de température soit bien atteint.

Enfin, dans beaucoup de cas (c'est en fait la seule solution dans un laboratoire courant pour les températures dépassant 1.500°), on peut se borner à une graduation par comparaison avec un pyromètre étalon dont la graduation a été vérifiée dans un laboratoire spécialisé. Une telle comparaison est facile ; il suffit de pointer successivement le pyromètre étalon et le pyromètre à étalonner sur une même source, qui peut être une lampe à ruban de tungstène munie d'un cran repère.

Avantages - Inconvénients - Corrections .- Le pyromètre à filament disparaissant présente de nombreux avantages, qui le font utiliser dans la plupart des cas. Il est très précis, il permet des pointés sur des sources de très faibles dimensions (inférieures au mm.), enfin, il est à l'abri des causes d'erreur que nous rencontrerons dans le pyromètre à radiation totale et qui tiennent à la présence possible de gaz, tels que CO_2 et H_2O. Seules les fumées visibles à l'oeil, peuvent perturber les mesures ; on en est averti par la visée dans l'instrument ; nous avons vu plus haut comment on pouvait s'en affranchir. Toutefois, ce type de pyromètre ne se prête pas à l'enregistrement automatique des températures, il nécessite la présence constante d'un observateur.

Dans l'usage de cet instrument, il est nécessaire de prendre un certain nombre de précautions, sur lesquelles nous croyons utile d'insister. En premier lieu, nous signalerons une erreur commise souvent par les débutants, et qui provient de ce que l'objectif de l'appareil peut être insuffisamment couvert par le faisceau provenant de la source. Dans le cas de la visée à l'intérieur d'un four muni de diaphragmes, ces diaphragmes devront être calculés de façon à ne pas arrêter le rayonnement qui, parti d'un point de la paroi centrale, s'appuie sur les bords de l'objectif. De même, si l'on dispose sur le trajet du faisceau un prisme à réflexion totale par exemple, ce prisme devra avoir des dimensions suffisantes pour ne pas diaphragmer le faisceau. Avant chaque mesure, il est sage de s'assurer, au moyen d'une feuille de papier blanc, que celui-ci couvre bien toute la surface de l'objectif.

En outre, il importe de bien préciser qu'un pointé effectué sur la surface d'un corps quelconque ne fournit pas sa température vraie, mais bien ce que l'on convient d'appeler sa température de brillance, toujours inférieure à sa température vraie. L'écart entre les deux températures (Tableau XI), est d'autant plus marqué que le pouvoir émissif est plus faible ; on trouvera les valeurs des pouvoirs émissifs monochromatiques des divers corps dans le tableau IV. Prenons comme exemple le cas du platine solide et supposons qu'un pointé ait fourni la température 1.200° le pouvoir émissif de ce métal étant égal à 0,30, la correction à ajouter à la lecture est égale à 170°, autrement dit, la température vraie du métal est 1.370°.

TABLEAU XI

CORRECTIONS A AJOUTER A LA TEMPÉRATURE LUE SUR UN PYROMÈTRE MONOCHROMATIQUE POUR OBTENIR LA TEMPÉRATURE VRAIE

Pouvoir émissif mono-chromatique	Températures de brillance lues sur le pyromètre (en degrés C)			
	800	1.000	1.200	1.400
0,10	137	201	276	365
0,20	94	133	183	240
0,30	69	96	130	170
0,40	41	73	97	125
0,50	38	55	72	95
0,60	27	39	53	69
0,70	19	28	37	48
0,80	12	17	23	29
0,90	6	8	11	14
Pouvoir émissif mono-chromatique	Températures de brillance lues sur le pyromètre (en degrés C)			
	1.700	2.100	2.500	3.000
0,10	530	810	1.170	1.800
0,20	342	510	725	1.200
0,30	245	360	510	750
0,40	180	265	370	495
0,50	133	197	273	400
0,60	97	142	195	290
0,70	66	60	134	170
0,80	41	59	83	115
0,90	19	27	39	55

De telles corrections sont importantes, elles sont également peu sûres, car le pouvoir émissif d'un corps est très notablement modifié par son état de surface. Aussi, chaque fois qu'on le peut, il est préférable d'effectuer une mesure directe de la température vraie, en perçant dans le solide un trou de faible diamètre ou s'il s'agit d'un liquide, en y plongeant un tube réfractaire dont la longueur est grande par rapport au diamètre.

Notons enfin que, si l'on est amené à interposer entre la source et le pyromètre une lame de verre ou un prisme à reflexion

totale, les réflexions de lumière sur les faces d'entrée et de sortie entrainent une correction non négligeable. Pour un verre bien transparent, le facteur de transmission d'une lame ou d'un prisme est d'environ 0,90 ; la correction à ajouter aux lectures sera prise dans le tableau IV (pouvoir émissif 0,90) ; à 1.000°, elle est de 8°, a 1.700°, de 19), L'interposition d'un ensemble prisme + lame donne un facteur de transmission 0,80, c'est-à-dire des corrections sensiblement doubles : 17° et 41°.

PYROMÉTRE A RADIATION TOTALE

Description et emploi.- Dans le pyromètre à radiation totale, toutes les radiations émises par la source sont envoyées, grâce à un dispositif optique, sur un récepteur noirci formé, en général, d'un simple disque mince ; l'élévation de température de ce récepteur est mesurée par un couple sensible dont la soudure chaude est soudée sur le récepteur et dont les extrêmités sont reliées aux bornes d'un millivoltmètre sensible. A chaque f.é.m. donnée par le millivoltmètre, on fait correspondre une température.

Le dispositif peut être un simple objectif en verre (1) (lunette pyromètrique), ou un miroir concave (télescope pyrométrique) donnant une image de la source sur le disque récepteur. Dans un tel appareil, il est indispensable que la dimension de la source soit suffisante pour couvrir totalement le récepteur (2).

Pour obtenir au millivoltmètre une déviation suffisante, on est amené à utiliser un récepteur d'assez grand diamètre (1 à 2 mm.) ; il en résulte que la dimension utile de la source est élevée : diamètre égal à environ le dixième ou le vingtième de la distance de la source à l'instrument, c'est-à-dire au moins 5cm. pour une source placée à un mètre. Une telle sujétion est assez gênante au laboratoire pour des fours de faibles dimensions.

"On peut, bien entendu, concevoir des appareils à grand foyer nécessitant un diamètre de source nettement plus faible (1 mm), mais la f.é.m. mise en jeu, nettement moins élevée, nécessite l'emploi d'un appareil de mesures plus sensible.

Avantages et inconvénients.- L'instrument précédent présente un avantage, le seul d'ailleurs, qui est de permettre l'enregistrement automatique des températures ; la f.é.m. du récepteur peut être, en effet, enregistrée à distance sur un millivoltmètre enregistreur.

En revanche, un tel appareil présente de graves inconvénients qui le font rejeter pour toutes les mesures autres que celles adaptées à l'enregistrement.

Un premier inconvénient tient à l'échauffement des pièces optiques qui rayonnent vers le récepteur et perturbent la gradua-

---

(1) Ou mieux en fluorine, beaucoup plus transparente aux radiations infra-rouge.

(2) Un dispositif oculaire permet de s'en assurer et d'effectuer le pointé correct.

tion (1) ; un second, plus grave, tient à l'absorption partielle des radiations infra-rouges par des gaz transparents tels que le gaz carbonique et la vapeur d'eau, existant toujours au voisinage des fours et dont la présence est difficilement décelable quantitativement.

Pour éviter ce double inconvénient, dans les installations destinées à l'enregistrement, on est amené à entourer tout le pyromètre par une gaine à circulation d'eau et à le pointer dans un tube réfractaire fermé, plongé dans le four, et dans lequel on fait passer un courant d'air, de façon à chasser les gaz absorbants qui pourraient pénétrer à son intérieur.

Bien entendu, comme le pyromètre monochromatique, le pyromètre à radiation totale, pointé sur une surface, ne fournit pas sa température vraie. Il est nécessaire d'effectuer la correction de pouvoir émissif total, extrêmement importante et peu sûre ; pratiquement, l'appareil ne peut servir qu'à des mesures au sein de fours, avec les précautions essentielles que nous venons d'indiquer.

Notons enfin que l'interposition d'une lame de verre ou d'un prisme à réflexion totale entraine des corrections impossibles à chiffrer ; en pareil cas, il importe de graduer l'instrument dans les conditions mêmes où il est appelé à servir.

RÉCEPTEURS PHOTOÉLECTRIQUES

Dans un pyromètre optique, monochromatique ou non, il est actuellement possible de recevoir le faisceau lumineux provenant de la source sur un récepteur autre que l'oeil ou la pile thermoélectrique, (cellule photoémissive, cellule à couche d'arrêt, cellule à multiplication d'électrons, ...). Pour permettre une amplification suffisante de la f.é.m. provoquée aux bornes du récepteur, on module le flux émis par la source et le flux modulé, amplifié, fournit à la sortie de l'amplificateur une tension suffisamment élevée pour être mesurée par un millivoltmètre portatif.

La sensibilité peut atteindre aisément 0,2 mV/ degré au voisinage de 1.500°C. On trouve actuellement dans le commerce des cellules suffisamment fidèles pour ne pas nécessiter un réétalonnage fréquent.

MESURE DE LA TEMPÉRATURE DES FLAMMES ET DES GAZ CHAUDS

La mesure de la température d'une flamme ou d'un gaz se heurte à de grandes difficultés si on veut l'effectuer en plongeant un corps thermométrique (couple) à leur intérieur ; de même une petite enceinte fermée plongée dans un gaz prend une température inférieure à celle du gaz, du fait du rayonnement de l'enceinte vers l'extérieur. On peut tourner en partie la difficulté, d'une part en entourant le corps thermométrique d'un écran em-

(1) Cet inconvénient est particulièrement grave dans les lunettes à optique de verre ou de silice fondue.

pêchant le rayonnement extérieur, d'autre part, en augmentant la vitesse des gaz autour de lui.

On a toutefois une précision bien supérieure en utilisant une méthode optique basée sur la validité de la loi de Kirchhoff au sein d'une masse gazeuse en équilibre thermique. Si le gaz renferme des particules solides en suspension qui donnent lieu à un rayonnement visible ;on l'éclaire avec une source S (fig. a), et on reçoit le rayonnement sur un récepteur R (pyromètre optique, cellule photoélectrique), muni d'un écran monochromatique. On démontre aisément (Kurlbaum) que, lorsque la source S est à la même température que le gaz, on peut supprimer la traversée du gaz sans rien changer à l'indication de R, le gaz émettant alors autant qu'il absorbe.

L'égalisation se fera en agissant sur l'intensité de la source S.

Lorsque le gaz ou la flamme sont transparents, on les colore par un sel métallique (Féry) et on remplace le récepteur R par la fente d'un spectroscope. Dans le spectre formé, on observe un fond continu provenant de la source S auquel se superpose la raie d'émission du sel. Si la source et la flamme sont à la même température, la raie disparaît ; si la flamme est plus chaude que la source, la raie apparaît brillante sur fond plus sombre ; si, au contraire, la flamme est plus froide, on observe le phénomène inverse. L'égalisation peut se faire visuellement ou photographiquement.

Dans l'un et l'autre cas, lorsque l'égalisation est obtenue, on aura la température cherchée par un pointé au pyromètre optique sur l'image de la source S produite en G.

Pour la mesure du facteur d'émission d'une flamme, le lecteur voudra bien se reporter à l'ouvrage du C.N.R.S. consacré au Colloque sur la Chimie des Hautes Températures - (11-13 mai 1954).-

ENREGISTREMENT ET RÉGULATION

L'enregistrement et la régulation des températures prennent une place de plus en plus importante dans les laboratoires de recherches. Nous nous limitons ici aux températures élevées, c'est-à-dire à celles qui dépassent le cadre habituel des thermostats en usage dans les laboratoires de physico-chimie, thermostats dans lesquels les appareils de régulation sont du type à dilatation de liquide, à tension de vapeur, ou à bilame.

Nous venons de voir, à propos du pyromètre à radiation totale, comment on peut, par voie optique, enregistrer, et par conséquent, régler la température d'une enceinte, et cela jusqu'aux températures les plus élevées (1). Les quelques directives géné-

(1) **On a proposé de remplacer le pyromètre à radiation totale par des cellules à couche d'arrêt (sélénium) ; leur emploi ne paraît pas s'être beaucoup développé jusqu'à présent en raison de leur manque de fidélité qui oblige à un contrôle fréquent au moyen d'une source tarée.**

rales que nous allons fournir sont, bien entendu, applicables à ce cas.

Aux températures moins élevées que peut supporter le couple Pt-PtRh, ce dernier instrument reste l'appareil s'adaptant le mieux au problème posé. Avec un tel couple, on peut évidemment suivre visuellement l'évolution de la température sur l'échelle d'un galvanomètre relié aux extrémités du couple. Ici, une remarque générale s'impose ; si l'on veut profiter de toute la sensibilité donnée par la méthode, on utilisera un potentiomètre (fig 33), dont le curseur M sera réglé au voisinage de la température à étudier ; les déviations du galvanomètre G, de part et d'autre du zéro, traduiront les différences entre la température cherchée et celle correspondant à la position du curseur.

Une telle technique, que nous retrouverons à propos de la régulation, comporte une précision extrême ; en effet, avec un galvanomètre sensible, il est possible d'obtenir sur l'échelle un déplacement du spot lumineux égal à plusieurs millimètres par degré. Cette façon de faire est, en particulier intéressante lorsqu'on cherche à tracer la courbe de solidification ou de fusion d'un métal, et, de façon générale, lorsqu'on recherche les variations d'une température au voisinage d'une valeur donnée fixée à l'avance (point de transformation, anomalie thermique...).

Qu'il s'agisse d'obtenir l'évolution d'une température ou d'un écart de température en fonction du temps, on pourra suivre visuellement l'indication du spot lumineux à intervalles réguliers et tracer à la main la courbe de variation ; on pourra également l'enregistrer photographiquement sur un tambour tournant. A cet effet, on utilisera une lampe à filament incandescent rectiligne et vertical ; le miroir du galvanomètre en donne une image sur une fente horizontale disposée en avant d'un tambour tournant recouvert de papier photographique. Un tel enregistreur, bien construit, doit permettre de travailler en salle éclairée ; on peut, si on le désire, contrôler la régularité de sa rotation en interrompant périodiquement le faisceau par un pendule ou tout autre dispositif définissant un intervalle de temps connu.

Si l'on veut éviter les quelques complications de l'enregistrement photographique, et si l'on ne recherche pas une grande précision, on adoptera un millivolmètre enregistreur, avec tracé à la plume sur feuille de papier fixée sur un cylindre ou un disque tournants. L'industrie livre des millivoltmètres enregistreurs à plusieurs courbes permettant l'enregistrement simultané de plusieurs températures ; un distributeur permet de relier successivement à l'instrument divers couples placés en différents points du four à contrôler.

Lorsqu'on veut déceler de faibles anomalies thermiques au sein d'une substance, on peut utiliser une méthode différentielle avec deux couples montés en opposition et plongés, l'un dans l'échantillon à étudier E_1, l'autre dans un second échantillon témoin E_2 ne présentant pas d'anomalie (fig 35) ; un galvanomètre G_1 donnera à tout instant la différence de température Δt entre les deux échantillons. Un second couple, placé en E_1, fournira à chaque instant sa température.

Pour les températures ne dépassant pas 1.000°, on peut remplacer le couple par un pyromètre utilisant la dilatation d'un barreau d'alliage "pyros", transmise à un dispositif d'amplification grâce à une tige de silice fondue. L'extrêmité de l'aiguille amplificatrice peut être munie d'une plume inscrivant ses déplacements sur un cylindre tournant ; l'enregistrement peut être également effectué par voie optique, grâce à la rotation d'un miroir amplificateur.

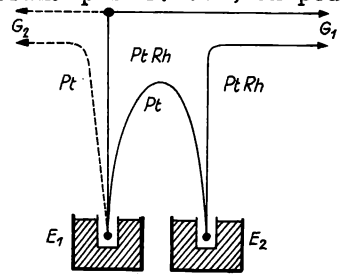


Fig. 35. - Montage différentiel pour l'étude de faibles anomalies thermiques.

RÉGULATION DES TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

La régulation d'une température procède des mêmes principes que ci-dessus. L'appareil chargé de la régulation (couple) mesure, en fait, la température de l'enceinte ou, ce qui est infiniment préférable, l'écart de température entre l'enceinte et la température fixée d'avance ; dans le premier cas, l'appareil de réglage (millivoltmètre) sera monté directement aux bornes du couple; dans le second, il sera disposé en G dans le montage potentiométrique indiqué plus haut (fig 33).

Il reste évidemment à préciser le dispositif permettant d'agir sur le four lorsque la température de ce dernier ce trouve supérieure ou inférieure à la valeur cherchée. Les détails mécaniques différent beaucoup d'un constructeur à l'autre ; le lecteur les trouvera dans les notices des divers constructeurs ; il faut reconnaître que la qualité de la régulation dépend en majeure partie de la précision mécanique apportée dans leur réalisation. Dans la plupart des cas, la technique employée consiste à utiliser un palpeur qui abaisse périodiquement l'aiguille du millivoltmètre sur l'un ou l'autre de deux contacts ; le contact "trop chaud" amène grâce à des relais, l'introduction d'une résistance supplémentaire dans le circuit de chauffe du four ; le contact "trop froid" supprime cette résistance.

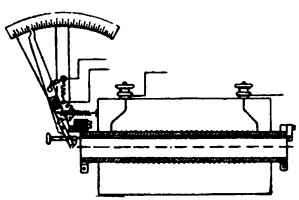


Fig. 36. - Régulateur à fil dilatable de Chévenard.

Le pyromètre à dilatation, très robuste, permet d'agir mécaniquement, de façon directe, sur des contacts actionnant les résistances de chauffage du four.

Nous allons donner en particulier quelques détails sur une régulation par fil dilatable réalisée par Chevenard (fig 36). Le tube T du four porte à chacune de ses extrémités un collier en invar ; l'un, C_1 , porte une petite proéminence à laquelle est fixé le fil F en alliage pyros servant à la régulation ; l'autre, C_2, porte en O un axe autour duquel tourne un étrier et auquel sont fixées l'aiguille a et l'extrêmité du fil. La dilatation du fil entraîne la rotation de l'aiguille grâce à un ressort de rappel R ; un bras

B, mobile à la main, tourne autour de l'axe O et permet le réglage de la température.

A cet effet, le bras B est séparé en deux par une pièce isolante ; la partie supérieure est reliée à une borne fixe b, isolée de la masse ; l'étrier Et est relié à une autre borne b' ; dans ces conditions, l'élévation de température du fil amène progressivement la pointe p de l'aiguille a en contact avec la partie métallique de B, fermant ainsi un circuit cc' actionnant un relais. Une échelle circulaire C porte une graduation en températures permettant de fixer par avance la température à régler dans le four ; un écrou Ec permet au besoin d'amener l'aiguille a en un point de la graduation correspondant à la température ambiante, lorsque le four est froid.

La figure 37 donne le schéma du montage électrique. Le secteur alternatif 110 volts est branché sur le four à travers des résistances réglables à fiches, de préférence (voir fig 6, p. 150) ; l'intensité admise dans le four est mesurée par un ampèremètre A. Aux deux extrémités d'une fraction R' de la résistance de réglage est relié un interrupteur à mercure I dont la rotation peut être provoquée par un noyau N de fer doux plongeant dans une bobine B'. Un petit transformateur T alimenté par le secteur, et fournissant à son secondaire une tension d'environ 8 volts, alimente la bobine B' par l'intermédiaire du contact : aiguille a bras B.

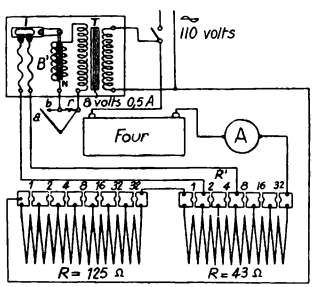


Fig. 37. - Montage électrique du régulateur à fil.

La régulation s'opère dès lors de la façon suivante. Lorsque la température du four atteint une valeur déterminée, l'aiguille a vient en contact avec le bras B, fermant ainsi le circuit secondaire du transformateur ; le noyau N est attiré dans la bobine et fait basculer l'interrupteur I, coupant ainsi la dérivation établie aux bornes de R' et introduisant cette résistance dans le circuit du four. La résistance R' peut être égale à la résistance totale de réglage du four. Le courant d'alimentation diminue et la température du four s'abaisse ; quand cet abaissement devient suffisant, la pointe p quitte le contact avec B. Une grande résistance r, disposée entre les bornes b et b' supprime l'étincelle de rupture, le courant cesse de passer dans la bobine B' et l'interrupteur bascule en sens inverse, mettant en court-circuit la résistance R' et faisant ainsi remonter l'intensité dans le four.

On peut d'une façon un peu différente, opérer le réglage "par tout ou rien". L'interrupteur I est alors mis en série sur le circuit d'alimentation du four et la résistance totale R réglée de façon à réaliser une intensité supérieure à l'intensité de régime du four pour la température cherchée. La rupture du contact a - B ferme l'interrupteur I et amène le passage du courant dans le four ; la fermeture de ce même contact coupe totalement le courant dans le four. Nous reviendrons plus loin sur les particularités de chacun des modes de réglage.

Certaines opérations modernes de recuit ou de trempe amènent de plus en plus les laboratoires à réaliser, dans un four, un "programme" déterminé de températures en fonction du temps. Pour arriver à ce but, un profil, tracé d'avance et entrainé par un mouvement d'horlogerie (ou moteur à vitesse constante) déplace les contacts précédents et fixe ainsi l'évolution de la température.

La réalisation, dans le cas du réglage par fil dilatable, s'opère de la façon suivante (fig 38). L'extrémité de l'aiguille précédente a peut se déplacer sur un tambour tournant recouvert d'une feuille de papier à la surface de laquelle on a fixé une lame d'argent découpée suivant le profil à reproduire ; ici : montée en température de 0 à 700° en 4 heures, maintien à 700° pendant 8 heures, décroissance lente de la température de 700° à 400° en 12 heures. La lame d'argent est reliée électriquement à la masse métallique du tambour tournant, laquelle est isolée par une pièce i, et reliée à la borne b.

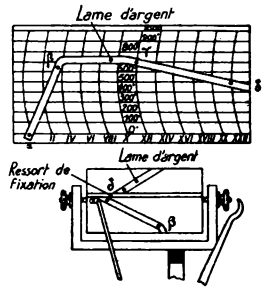


Fig. 38. - Dispositif pour la réalisation d'un programme de chauffe.

Le dispositif de régulation s'opère ici par "tout ou rien". Au commencement du chauffage du four, on amène la pointe p de l'aiguille a en contact avec le point 0 du profil (température ambiante) et l'on provoque la rotation du tambour. Cette rotation amène la rupture du contact et la fermeture du circuit du four ; la température du four s'élève jusqu'à ce qu'un nouveau contact se produise qui amène la coupure du courant, et ainsi de suite . L'aiguille suit ainsi le bord de la lame, à de faibles oscillations près. La résistance de réglage du courant doit évidemment être choisie de façon à atteindre la température maximum du cycle imposé, ici 700°.

La réalisation, dans ces dernières années, d'amplificateurs de forces électromotrices faibles, fournissant des facteurs d'amplification supérieurs à 100.000, a conduit à une autre solution du problème de la régulation des températures. Le couple thermo-électrique de réglage est associé à un montage potentiométrique (fig 33) et le curseur M réglé sur une température déterminée. Si la température du four vient à varier, en plus ou en moins, de 1° par exemple, cela correspond, pour un couple Pt-PtRh à une f.é.m. de $\pm$ 10 microvolts ; au lieu de déceler cette faible force électromotrice au moyen d'un galvanomètre G, on peut l'amplifier 100.000 fois et obtenir ainsi une f.é.m. de $\pm$ 1 volt, suffisante pour actionner directement des contacts mécaniques agissant sur les résistances électriques de réglage ou, dans le cas d'un four à flamme, sur des vannes modifiant l'arrivée du gaz combustible.

Dans ce qui précède, nous avons supposé que la régulation était assurée par un couple thermo-électrique. Aux températures élevées, un tel couple devient inutilisable : on peut le remplacer par un pyromètre à radiation totale étudié de façon à donner, pour une température de 1.800° par exemple, une force électromo-

trice d'environ 15 millivolts. Ce pyromètre pourra se substituer au couple dans un régulateur potentiométrique.

Influence de l'inertie du four sur la régulation. - Les limites extrêmes d'oscillation de la température dans un four à régulation automatique ne dépendent pas uniquement du régulateur, mais également, et souvent pour la plus grande part, de l'inertie thermique du four.

Supposons en effet un régulateur qui fonctionne pour des écarts de $\pm$ 1° par rapport à la température moyenne θ (fig 39) ; admettons également que la régulation se fasse par tout ou rien, provoquant des coupures successives du courant C_1 C_2 et des fermetures de ce courant F_1 F_2. Au moment de la coupure C_1, le four a atteint la température θ + 1 mais, du fait de l'inertie dans la transmission de la chaleur entre l'enroulement et le four, la température du four continue à monter pendant un certain temps, passe par un maximum M_1, puis décroit. Lorsque cette température est tombée à θ - 1 (point F_1), le régulateur fonctionne et rétablit le courant, mais la température du four continue à décroitre passe par un minimum, puis croit. Après la coupure C_2, la courbe se retrouve évidemment identique à ce qu'elle était après la coupure C_1, et ainsi de suite.

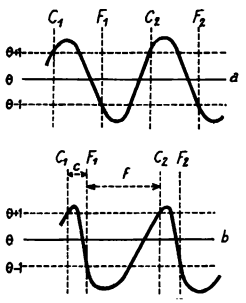


Fig. 39. - Oscillation de températures avec réglage par "tout ou rien".

On obtient ainsi dans le four une courbe de température, d'allure grossièrement sinusoidale, mais dont les amplitudes autour de la moyenne sont supérieures à celles qui résulteraient de la seule action du régulateur. Ces amplitudes, pour un régulateur donné, sont évidemment d'autant plus grandes que l'inertie thermique du four est plus élevée, c'est-à-dire que le réfractaire interposé entre l'enroulement et l'enceinte du four à une épaisseur plus grande et une conductibilité calorifique plus faible ; cette inertie croit également avec la masse de calorifuge disposée autour de l'enroulement. Pour réduire au maximum cette inertie thermique, on disposera l'enroulement à l'intérieur du tube réfractaire (p. 146) ; ce dernier, ainsi que le calorifuge qui l'entoure, auront une masse calorifique aussi réduite que possible ; cela conduit évidemment à des déperditions importantes, c'est-à-dire à des consommations de courant plus élevées.

Le réglage par tout ou rien schématisé par la figure 39 a, suppose que l'intensité maximum I_m admise dans le four pendant une fermeture est nettement supérieure à l'intensité de régime I_r, de façon que la période de coupure soit sensiblement égale à la période de fermeture ; cela entraine évidemment la condition :

$$I_m^2 = 2\, I_r^2$$

On peut au contraire choisir une intensité I_m légèrement supérieure à I_r ; dans ces conditions, la période de coupure c sera

nettement plus courte que la période de fermeture f (fig 39b) ; il faut en effet que l'on ait sensiblement :

$$f I_m^2 = (f + c) I_r^2,$$

relation qui fixe le rapport f/c.

Au lieu de régler par tout ou rien, il est nettement préférable que l'interrupteur ne coupe ou ne rétablisse qu'une faible partie R' de la résistance de réglage (fig. 37). Si le courant de régime pour la température désirée est d'environ 2,7 ampères, on s'arrangera pour que les coupures et fermetures correspondent, par exemple, à des intensités 2,5 et 2,8 ampères ; on aura ainsi une courbe de température dans le four dont les amplitudes seront réduites au minimum (0,6°) (fig. 40a); des intensités 2,2 et 3,0 ampères donneraient une amplitude plus grande (fig 40b) ; enfin un réglage se rapprochant du réglage par tout ou rien (1,6 et 4,5 ampères) donne une amplitude totale dépassant 3° (fig. 40c).

Il ne faut pas se dissimuler toutefois qu'un réglage à faible marge d'intensité nécessite une plus grande surveillance en cas de fluctuations de la tension du secteur. Dans le cas de la figure 40a, si la tension du secteur vient à baisser de 10 %, les intensités 2,5 et 2,8 ampères deviendront respectivement 2,25 et 2,5 ampères, et la plus forte de ces valeurs risque de tomber au-dessous de l'intensité de régime, ce qui amènera une baisse de température du four. De même si la tension vient à monter de 10 %, la plus faible des valeurs de l'intensité deviendra 2,75 ampères, le régulateur cessera de fonctionner et la température se fixera à une température trop élevée. Il convient donc de garder une marge de courant suffisante pour parer aux variations possibles de la tension du secteur.

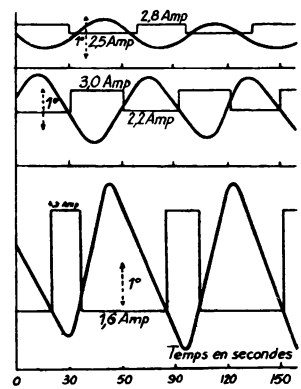


Fig. 40. - Oscillations de températures avec différents réglages.

Les figures 40 ont été fournies par un couple, placé directement au sein d'un four Chévenard avec une régulation à fil dilatable. Pour insister sur le rôle joué par les diverses parties du four dans la régulation, supposons que l'on se soit proposé de régler la température dans une masse assez peu conductrice de la chaleur en utilisant à cet effet un couple noyé dans la masse. il va de soi que l'inertie, dans la transmission de la chaleur du couple à la résistance de chauffe, va se trouver accrue et que, de ce fait, l'amplitude des oscillations de température au centre de la masse va croître d'autant plus que la masse est plus importante et moins conductrice. Dans une masse pulvérulente, une régulation par tout ou rien risquerait de donner, entre le centre et l'extérieur de la charge, des écarts de températures extrê-

mement importants ; en pareil cas, il convient de choisir une marge assez faible entre les deux intensités encadrant l'intensité de régime.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages fondamentaux

M. DERIBERE : Les fours électriques à arc. (Brochure éditée par la Société pour le développement de l'électricité).

R. GAUTHERET : Les résistances métalliques. Les résistances non métalliques et leurs applications. Les fours électriques à résistance (Brochure éditée par la Société pour le développement de l'électricité).

HENNING : Handbuch der Physik. Temperatur Messung, p. 521 à 610. Berlin (1926).

P. LEBEAU : Les hautes températures et leurs utilisations en chimie 2 vol. (Masson, édit.) 1950-1397 pages.

J. MINSSIEUX : Les fours à induction. (Brochure éditée par la Société pour le développement de l'électricité).

G. RIBAUD ; Mesure des températures, Collection Armand Colin, 2° édition (1941).

Colloque du C.N.R.S. sur la Chimie des Hautes Températures (mai 1954).

Périodiques

Annales de Chimie et Physique, Paris,

France Energétique (depuis 1944), Paris.

Journal de Physique, Paris.

Mesures, Paris.

Revue d'Optique, Paris.

Technique moderne, Paris.

Technologic papers of the Bureau of Standards, Washington.

DEUXIÈME PARTIE

LA MESURE DES TEMPÉRATURES DE FLAMMES

INTRODUCTION

Les procédés usuels de mesure des températures présentent des difficultés d'emploi et sont même en défaut dans certains cas; notamment dans les flammes et dans les écoulements de gaz chauds à grande vitesse. Dans ces conditions, assez particulières, rencontrées notamment dans les études sur la combustion, deux classes de méthodes sont applicables, la première adoptant les sondes habituelles et la seconde utilisant des procédés optiques.

Nous décrivons sommairement les plus récents dispositifs réalisés en nous attachant particulièrement aux thermomètres électro-optiques.

NATURE DES DIVERSES ESPÈCES DE FLAMMES

Avant d'aborder les techniques des mesures, nous allons essayer de préciser, d'une manière très élémentaire, la nature physique des grandeurs que l'on veut déterminer. Très schématiquement, on peut envisager deux systèmes de flammes suivant qu'elles sont en équilibre chimique et composées d'émetteurs isothermes, ou en évolution chimique et renfermant des émetteurs non isothermes.

Les méthodes de mesure utilisant un élément introduit dans la flamme ne sont pas sensibles à ces différences de structures. Le récepteur indique alors la température de translation des molécules pour la région étudiée. Des grandeurs anormales peuvent être observées, mais elles ne sont dues qu'à des phénomènes secondaires (catalyse par exemple) du milieu en réaction avec l'élément. Les procédés optiques, basés sur les lois du rayonnement, sont beaucoup plus sensibles à ces différences. Les flammes du premier type donnent presque toujours des températures normales tandis que pour les flammes du second type, on observe parfois des températures dites anormales. Celles-ci atteignent des valeurs que l'on ne peut prévoir par un calcul thermodynamique classique. D'ailleurs, les procédés optiques peuvent être scindés également en deux catégories principales :

1°) Les méthodes d'études de rayonnement dont les fondements physiques reposent sur les lois d'émission du corps noir et sont ré-

gies par les relations classiques de Planck, Wien et Kirchhoff. Dans le cas des flammes du premier type, les résultats obtenus sont, d'une manière très générale, excellents. Dans les autres espèces de flammes, l'application de ces relations est incertaine et il est trop tôt pour prendre une position définie. On a cependant obtenu des résultats acceptables en étendant ces principes à des flammes n'ayant pas encore atteint un équilibre chimique et pour des régions du spectre exemptes de rayonnement de chimiluminescence (émission des radicaux, fluorescence).

2°) Les procédés utilisant l'émission de centres actifs, principalement le rayonnement attribué aux chaînons intermédiaires des réactions de combustion et appelés radicaux libres (CH, OH, C_2, CN). L'intensité de ces radiations, d'ailleurs non continues et résolubles en bandes, n'est plus simplement régie par les lois classiques du rayonnement. La spectrographie introduit ici des notions de températures différentes selon que l'on observe des raies émises par les molécules en rotation, vibration ou translation électronique.

D'une manière générale, ce sont les températures de translation qui sont recherchées par les ingénieurs qui étudient le fonctionnement et le rendement des chambres de combustion. Les températures anormales traduisent une excitation chimique de la molécule et intéressent plus particulièrement les physiciens qui étudient le processus de la combustion. Nous développerons ici les méthodes et techniques utilisées pour la mesure et l'enregistrement des températures de translation.

PROCÉDÉS DE MESURES NÉCESSITANT L'IMMERSION DANS LE FLUIDE D'INSTRUMENTS DIVERS

Nous examinerons dans ce paragraphe les récents développements des thermocouples, spécialement leur application aux sondes à aspiration.

Nous ne rappellerons pas ici le principe des thermocouples ainsi que les méthodes d'étalonnages qui ont été exposées précédemment.

Nous nous arrêterons seulement sur les sources d'erreur résultant du mouvement dirigé des gaz et des pertes de chaleur par rayonnement.

Quand la vitesse des gaz dépasse une certaine valeur, l'énergie cinétique du mouvement dirigé devient une fraction appréciable de celle qui est due au mouvement des molécules. Un élément de mesure plongé dans un milieu sans vitesse dirigée indiquera la température de translation de ces molécules, on l'appelle également température statique T_s. Ce même élément dans le même milieu de température T_s mais animé d'une vitesse V indiquera une température intermédiaire T_i, supérieure à T_s mais inférieure à la température totale T_t que l'on aurait obtenue en amenant adiabatiquement le gaz au repos.

Entre les deux températures T_s et T_t , on peut écrire les deux relations suivantes :

$$T_t - T_s = V^2 / 2 g J c_p$$

et

$$T_t / T_s = 1 + (\gamma - 1) M^2 / 2$$

(M = nombre de Mach = vitesse du fluide/vitesse du son)

La température intermédiaire T_i dépasse T_s d'une fraction presque constante de l'intervalle $T_t - T_s$, appelée le facteur de récupération de l'élément. Il est fonction de la forme de l'élément de mesure et varie peu avec la composition, la température, la pression ou la vitesse de l'écoulement. Par définition, ce facteur r s'exprime par le rapport :

$$r = (T_i - T_s) / (T_t - T_s)$$

soit

$$T_t = T_i + (1 - r) V^2 / 2 g J c_p$$

Cette dernière relation montre que la température du gaz peut être calculée à partir de la température indiquée si l'on connaît la vitesse de l'écoulement, la chaleur spécifique du gaz et le facteur de récupération de l'élément.

La soudure de l'élément s'échauffe principalement par convection. Le coefficient de transfert de chaleur par convection est sensiblement proportionnel à la racine carrée de la vitesse d'écoulement massique. Donc, si la température du gaz et des parois restent constantes et que l'élément ait des fuites thermiques, la température indiquée variera de la même manière que le débit massique.

Le rayonnement intervient peu dans l'échauffement, la température des gaz étant proche de celle de l'élément. C'est principalement un facteur de fuite thermique, la vitesse de perte par rayonnement est proportionnelle à :

$$\sigma \varepsilon \ (T_i^4 - T_\omega^4) ,$$

ε est l'émissivité par unité de surface, T_ω la température des parois. L'erreur thermométrique résultante dépend à la fois de la vitesse de perte due au rayonnement et du rapport de cette vitesse à celle du gain de chaleur par convection.

La figure 1 représente l'influence combinée du rayonnement et de l'impact sur la température T_i atteinte par un thermocouple chromel-alumel de facteur de récupération 0,65 dans un gaz à Ps = 1 atm. et T_ω = 530°C. Ces courbes montrent la grandeur de l'erreur qui peut provenir du rayonnement et de l'impact si l'on n'applique pas les corrections convenables.

Dans le cas des mesures dans les écoulements rapides, les thermocouples doivent avoir une tenue mécanique suffisante pour résister à l'impact des gaz. Pour cela, ils doivent être faits avec des fils de section relativement importante qui augmente leur temps de réponse. Les tubes qui guident les fils jusqu'à la soudure doivent être forts et, à cause des effets de cisaillement, maintenus

en contact intime avec les conducteurs. La résistance mécanique est également altérée par l'effet de la température qui modifie la structure cristalline de certains métaux utilisés, au point de les rendre cassants. Par exemple, l'alumel souvent utilisé avec le chromel, est sujet à ces modifications de structure. Les alliages iridium-rhodium ont une bonne résistance.

Des compromis doivent être recherchés, pour des applications particuiières, entre le temps de réponse, la résistance mécanique, la corrosion et la f.é.m.

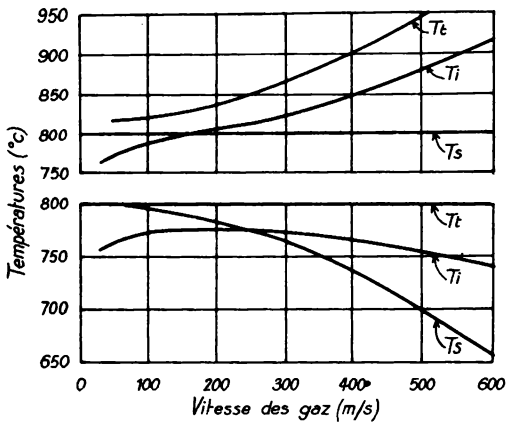


Fig. 1.- Effet combiné du rayonnement et de l'impact. Thermocouple chromel-alumel ayant un facteur de récupération de 0,65

Les additifs ou impuretés en solution dans les carburants affectent la résistance des soudures. Par exemple, l'alumel qui est résistant à l'oxydation est détérioré par les traces de soufre et les dérivés du plomb contaminent les métaux comme le platine.

Pour réduire les pertes par rayonnement, un certain nombre de dispositifs ont été réalisés consistant à placer la soudure à l'intérieur d'un petit tube dans lequel s'effectue une circulation des gaz chauds. Ceci permet de plus d'accroître sensiblement le facteur de récupération. On obtient de bien meilleurs résultats si la soudure est installée dans un col où la vitesse des gaz est maintenue toujours sonique par aspiration.

De cette manière, le transfert de chaleur par convection sur la soudure est maintenu à une valeur maximum.

La vitesse des gaz est donnée par :

$$V_c^2 = \gamma g R T_s$$

et on en déduit :

$$T_s = 2 T_t / (\gamma + 1)$$

Cette relation permet d'exprimer la température totale T_t en fonction de γ moyen, de la température indiquée et du facteur de récupération :

$$T_t = (\gamma+1)\ T_i\ /\ [2+r(\gamma-1)] = \alpha\, T_i$$

en posant :

$$\alpha = (\gamma+1)\ T_i\ /\ [2+r(\gamma-1)]\ .$$

Si le coefficient α était constant, l'étalonnage serait simple, mais il faut tenir compte de la variation de γ avec la température. Le facteur de récupération doit rester constant, ce qui est vérifié avec une bonne approximation. Entre la température ambiante et 3273°K, le γ moyen de l'air varie de 1,4 à 1,28, ce qui conduit à une incertitude sur α (en supposant $r = 0,87$) de 0,6 %. Pour des gaz provenant de la combustion du kérosène dans l'air entre 200 et 1.400°K, γ varie de 1,39 à 1,29. La figure 2 montre une disposition du couple dans la tuyère.

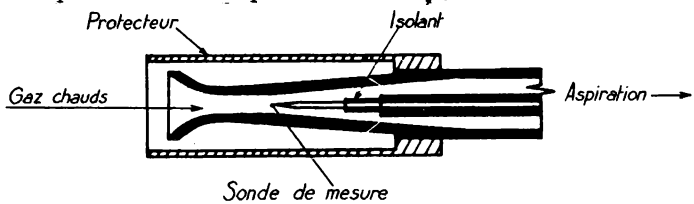


Fig. 2.- Sonde à aspiration sonique. Le thermocouple est placé au col d'une tuyère où la vitesse des gaz est maintenue sonique par une aspiration appropriée.

MÉTHODES OPTIQUES

Les procédés basés sur l'emploi de sondes plongées dans l'écoulement chaud sont difficiles à employer pour des températures supérieures à 1.500°C et aux grandes vitesses. Les méthodes optiques ne souffrent pas de ces limitations, ni des corrections dues aux fuites thermiques et à la vitesse des gaz.

Nous exposons les principales méthodes optiques en insistant plus particulièrement sur les techniques récentes de la pyrométrie d'absorption et d'émission qui ont été développées dans les dernières années.

TEMPÉRATURE DE BRILLANCE ET TEMPÉRATURE VRAIE

La température de brillance T_L est celle pour laquelle l'émetteur à étudier rayonne la même intensité spectrale qu'un corps noir, à la même température. Elle est reliée à la température vraie T_L° de l'émetteur par la relation :

$$1/T_L^\circ - 1/T_L = (\lambda/C_2)\ \mathrm{Log}\ \varepsilon(\lambda)\ .$$

Pour calculer la température vraie à partir de la température de brillance, il faut donc connaître l'émissivité $\varepsilon(\lambda)$ du corps. Une mesure, par pointé direct, au pyromètre optique, ne donne la température vraie de l'émetteur que dans le cas particulier où $\varepsilon(\lambda) = 1$. La méthode se prête alors très simplement à l'enregistrement direct en utilisant un phototube comme récepteur. Ce procédé présente deux difficultés fondamentales :

- La condition du corps noir doit être réalisée à tout instant et en tout lieu de la flamme. Il faut introduire suffisamment d'émetteurs étrangers (Na ou K .....), ce qui peut modifier le mécanisme de la réaction.

- La tranche spectrale isolée sur le récepteur doit avoir même largeur (et surface) pour la flamme et le corps de comparaison. Ce dernier point peut être réalisé en effectuant la mesure avec des fentes très fines, mais dans ce cas, il y a un compromis à respecter entre la sensibilité, le temps de réponse et le bruit de fond. La condition du corps noir sera d'autant mieux assurée que la bande spectrale étudiée sera plus étroite.

MÉTHODE DES DEUX COULEURS

Par définition, la température de couleur T_c d'un émetteur est celle pour laquelle un corps noir émet un rayonnement de même rapport d'intensité pour deux longueurs d'onde données.

Elle est reliée à la température vraie T_L° par l'expression :

$$\frac{1}{T_L^\circ} - \frac{1}{T_c} = \frac{\text{Log}\ \frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)}}{C_2\left[\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right]},$$

C_2 étant une constante de la relation de Planck.

Cette méthode nécessite la mesure d'un rapport d'intensité de deux longueurs d'onde. Elle suppose que soient connues les émissivités pour chacune des radiations utilisées ou que l'on puisse considérer l'émetteur rayonnant comme un corps gris. Il est donc nécessaire d'avoir une flamme éclairante émettant un rayonnement pour ces deux longueurs d'onde. Puisque la température de couleur se mesure par un rapport d'énergie dans deux régions du spectre émis, on peut interposer sur le trajet une fenêtre qui assure l'étanchéité et dont l'absorption, si elle est uniforme dans le spectre visible, ne modifie pas le rapport mesuré.

Dans des cas particuliers, divers auteurs ont étudié la variation du pouvoir émissif des flammes lumineuses dans le visible et le proche infrarouge.

Hattel et Broughton ont indiqué la loi suivante :

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - \exp\left(-\frac{KL}{\lambda Q}\right)$$

dans laquelle, K et Q sont des constantes valables dans un domaine limité, L étant l'épaisseur de la flamme.

Un dispositif utilisant ces principes a été appliqué dans des études sur la combustion dans des moteurs Diesel. L'énergie incidente, reçue sur un écran diffusant, est reprise par un système optique comportant essentiellement un miroir semi-transparent qui le fractionne en deux faisceaux, l'un transmis, l'autre réfléchi. Chacun de ces faisceaux traverse un filtre, rouge pour l'un, vert pour l'autre, avant d'impressionner la cathode du multiplicateur d'électrons. Les tensions électriques qui en résultent sont enregistrées sur un oscillographe cathodique à double faisceau.

MÉTHODE DE MESURE PAR INVERSION D'UNE RAIE SPECTRALE

Depuis les premières publications de Féry et Kurlbaum, on s'est efforcé de développer le procédé d'inversion des raies, de le rendre dynamique et susceptible d'enregistrer des variations rapides de températures.

Une raie spectrale excitée thermiquement est analysée par un spectroscope qui reçoit également les radiations d'une lampe de référence. Si le fond continu émis par cette lampe est à un niveau de température de brillance plus faible que la température de la flamme, la raie apparaît brillante sur un fond plus sombre. C'est l'inverse que l'on constate si la température de la lampe est supérieure à la température vraie de la flamme. Au point dit de renversement, la raie disparait dans le fond continu et la température vraie de la flamme égale la température de brillance de la lampe. Si $J(\lambda, T_L)$ représente l'énergie émise par le filament au voisinage immédiat de la raie étudiée, l'énergie totale reçue par le récepteur de rayonnement pour la longueur d'onde λ est :

$$J^t(\lambda) = \left[1 - \alpha(\lambda, T_F)\right] J(\lambda, T_L) + J(\lambda, T_F)$$

au point de renversement :

$$J^t(\lambda) = J(\lambda, T_L^r)$$

d'où

$$\alpha = \frac{J(\lambda, T_F)}{J(\lambda, T_L^r)}$$

Si l'on admet que la loi de Kirchhoff peut s'appliquer dans ce cas, on écrit :

$$J(\lambda, T_F) = \alpha J(\lambda, T_F^\circ)$$

et l'on trouve ainsi que

$$T_L^r = T_F^\circ$$

T_F° étant la température vraie de la flamme.

Les résultats ne seront corrects que si les mesures sont effectuées sur une radiation spectrale excitée thermiquement. Ce

raisonnement s'étend également aux flammes émettant un rayonnement continu, la tranche spectrale utilisée pouvant, dans ce cas, avoir une largeur plus importante.

Bien que quelques anomalies aient été citées, cette méthode constitue actuellement le procédé optique le plus sûr et le nombre d'expériences et essais donnant des résultats normaux est élevé. Les cas d'anomalies signalés correspondent plutôt à des applications très particulières de la méthode.

PYROMÉTRIE RAPIDE D'ABSORPTION ET D'ÉMISSION

Cette appellation englobe les développements récents de la méthode de renversement de raies. Les études sur des chambres de combustion ont montré la nécessité d'enregistrer les températures de flammes, celles-ci pouvant varier rapidement au cours du temps.

La complexité relative des réalisations qui ont été signalées ces dernières années est due principalement au fait qu'il faut comparer alternativement, et dans les mêmes conditions, l'énergie émise par la lampe de référence avant et après traversée de la flamme. Dès 1940, des méthodes à double circuit ont été proposées, mais les enregistrements n'ont pu devenir dynamiques qu' avec les derniers développements des cellules photoélectriques et multiplicateurs d'électrons. Des appareils d'une grande complexité optique et électronique ont alors été construits. D'une manière générale, on a cherché à analyser simultanément l'énergie d'une lampe avant et après traversée de la flamme, par exemple en modifiant l'intensité du courant dans la lampe, jusqu'à égalité, cette recherche pouvant se faire manuellement ou électroniquement.

Les études sur la combustion ont nécessité la recherche de procédés ultra-rapides, de conception simple, et d'un fonctionnement sûr. Nous indiquons ici les appareils qui sont couramment utilisés au banc d'essais de fusées à liquides de l'O.N.E.R.A. (1). Ils peuvent se classer dans l'ordre suivant :

1°) Appareil pour l'étude des flammes émettant, soit un fond continu, soit une radiation monochromatique. Le diamètre maximum utilisable est limité à 30 cm. environ, et on peut enregistrer 6.000 mesures par seconde. Le dépouillement des enregistrements demande quelques calculs simples.

2°) Appareil pour étude de flammes complexes, de grandes dimensions. Il permet :

a) L'enregistrement jusqu'à 3.000 par seconde de la température par un procédé calqué sur le dispositif précédent.

b) Inscription de la courbe de température conduisant à l'obtention directe du diagramme temps/température avec un temps de réponse de de 0,1 seconde.

(1) Brevets n° 604 254 ; 607 558 ; 50 277 ; 668 014.

c) Dispositif pour l'étude des températures instantanées de flammes de structure quelconque avec un temps de réponse de l'ordre de 10^{-5} seconde. Il est particulièrement adapté à l'étude des phénomènes explosifs ou toute autre combustion instantanée.

PROCÉDÉS D'ENREGISTREMENTS

Pour les études de flammes, nous devons considérer le cas général pour lequel $0<\alpha(\lambda)\leqslant 1$. La méthode de renversement nécessite une série d'observations alternées et ne se prête pas à l'enregistrement direct. Mais la température peut être calculée à partir des trois paramètres suivants :

$$J(\lambda, T_L) = \text{lampe seule.}$$

$$\left[1-\alpha(\lambda, T_F)\right] J(\lambda, T_L) + J(\lambda, T_F) = \text{lampe + flamme.}$$

$$J(\lambda, T_F) = \text{flamme seule.}$$

$\alpha(\lambda, T_F)$ étant le coefficient d'absorption de la flamme pour λ .

Ces trois énergies, reçues par un récepteur, sont transformées en tensions observées sur l'écran d'un tube cathodique.

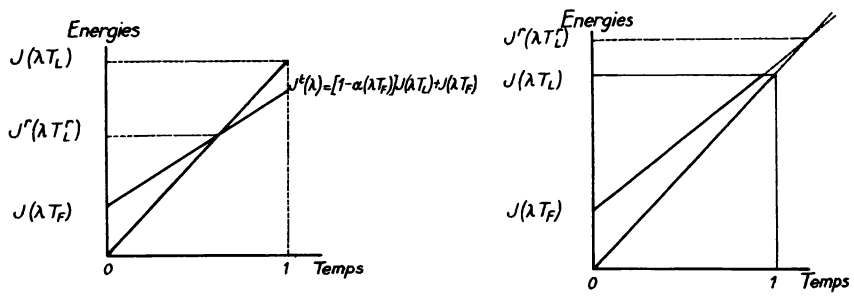


Fig. 3.- Courbe de variations des énergies dans le temps. Le point de renversement se situe à l'intersection des deux droites. Si la température de la flamme est plus basse que celle du filament (T_L), ce dernier est à l'intérieur du diagramme. Il est à l'extérieur si le contraire se produit.

Supposons réalisé un système physique qui ferait varier la quantité d'énergie émise par la lampe selon une loi linéaire en fonction du temps.

La droite : $J(\lambda, T_L) = f(T)$

peut être tracée sur un diagramme (fig. 3). Sur ce même diagramme avec les mêmes unités, représentons la deuxième droite :

$$\left[1\ \alpha(\lambda, T_F)\right] J(\lambda, T_L) + J(\lambda, T_F) = g(t)$$

Le point d'intersection de ces deux droites donne la valeur du coefficient de transmission τ du filtre réduisant la brillance de la lampe au niveau $J(\lambda, T_L^r)$

puisque :

$$J(\lambda, T_L^r) = \frac{J(\lambda, T_F)\, J(\lambda, T_L)}{J(\lambda, T_L) + J(\lambda, T_F) - \left[1 - \alpha(\lambda, T_F)\right] J(\lambda, T_L) - J(\lambda, T_L)}$$

avec les notations précédentes :

$$\frac{J(\lambda, T_L^r)}{J(\lambda, T_L)} = \tau(\lambda) = \frac{Y_3}{Y_1 + Y_3 - Y_2}$$

τ ainsi déterminé est indépendant des coefficients d'amplification des récepteurs et montages électroniques qui leur font suite ainsi que du coefficient d'absorption.

Il peut avoir les valeurs suivantes :

$0 < \tau \leqslant 1$ si la flamme est à une température inférieure ou égale à la température de brillance du filament,

$1 < \tau$ si la flamme est à une température supérieure.

Dans ce dernier cas, ce nombre n'a plus la signification physique d'un coefficient de transmission d'un filtre.

On obtient donc, par ce procédé, la valeur $\tau(\lambda)$ du filtre qu'il faudrait interposer devant le filament de la lampe à la température de brillance T_L émettant l'énergie $J(\lambda, T_L)$ pour réduire (ou élever) celle-ci au niveau $J(\lambda, T_L^r)$ correspondant au point de renversement pour lequel : $T_L^r = T_F^\circ$

La figure 3 montre également que la valeur du coefficient $\alpha(\lambda)$ est donnée par l'expression :

$$\alpha(\lambda) = \frac{Y_1 + Y_3 - Y_2}{Y_1}$$

Le coefficient $\tau(\lambda)$ déterminé, la température T_L^r est calculée d'après la température de brillance du filament T_L par la relation :

$$-\log \tau = \frac{C_2 \log e}{\lambda} \left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_L^r} \right)$$

$C_2 = C^{te}$ 1,432 cm/degré.

Pour une longueur d'onde fixe, on obtient :

$$\log \tau = k \left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_L^r} \right)$$

Cette relation étant linéaire, l'abaque de dépouillement s'obtient facilement en traçant, pour une température quelconque, le faisceau de droites correspondant à diverses longueurs d'onde, ceci pour un τ variant, par exemple, de 0,1 à 20 (fig. 4).

L'utilisation de cet abaque est aisée. Sur l'échelle en $1/T$ ayant $\tau = 1$ pour origine, on repère la température de brillance utilisée dans l'essai considéré. Celle-ci est connue par étalon-

nage préalable du filament avec un pyromètre optique. Par ce point, on trace la parallèle à la droite du faisceau correspondant à la longueur d'onde utilisée et l'on obtient la droite de travail. La pente variant comme $C_2 \frac{\log e}{\lambda}$, il est possible de la tracer exactement pour la longueur d'onde utilisée. Notons que la température de brillance du filament pour la longueur d'onde en question est reliée à celle déterminée normalement à 0,665 μ par la relation :

$$\frac{1}{\theta} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{C_2} \log \varepsilon(\lambda) .$$

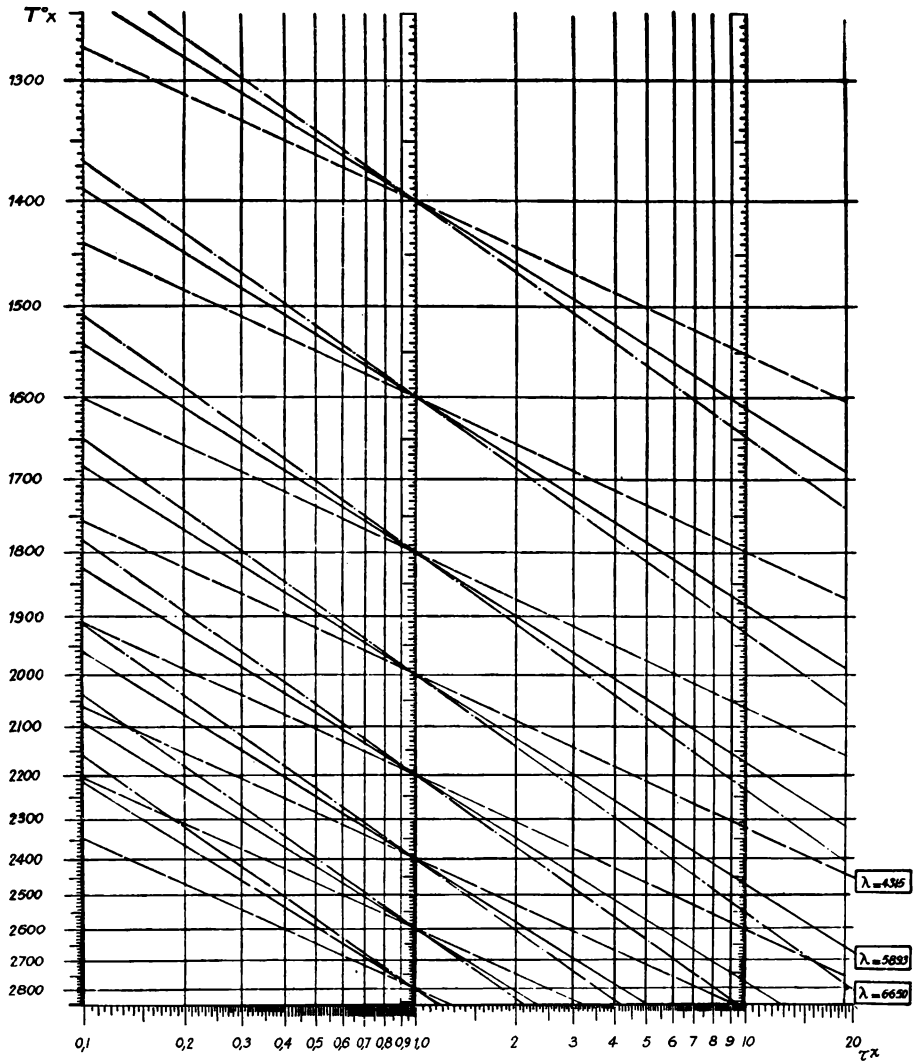


Fig. 4.- Abaque pour la détermination des températures.

Pour diverses radiations suffisamment proches, on peut faire la correction approchée :

$$-\frac{d\theta}{\theta^2}=\frac{\lambda}{C_2}\ \frac{d\varepsilon(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$$

(Voir tableau 345 du chapitre 47 pour l'émissivité du tungstène)

PRÉCISION DES MESURES

Le phénomène physique étant supposé normal, c'est-à-dire que la flamme est en équilibre thermique et chimique, et n'émet pas un rayonnement de chimi-luminescence, l'incertitude sur T est donnée par :

$$\Delta T_L^r=\frac{\lambda}{C_2}\ \frac{\Delta\tau}{\tau}\left(T_L^r\right)^2$$

L'incertitude sur λ étant négligeable, l'erreur principale porte sur l'estimation de τ . Elle est donnée par :

$$\frac{\Delta\tau}{\tau}=\frac{\Delta Y_3}{Y_3}+\frac{\Delta Y_1+\Delta Y_2+\Delta Y_3}{Y_1+Y_2+Y_3}$$

Les pointés des élongations du spot de l'oscillographe peuvent être faits à 1 %, on en déduit que l'erreur sur la température aux environs de 2.000°K est de $\pm$ 10°. Cet écart est certainement supérieur à ceux dépendant du phénomène physique lui-même.

CONDITIONS A REMPLIR PAR LE SYSTÈME OPTIQUE

Le récepteur doit nécessairement "voir" la flamme et le filament sous le même angle solide. La source n'étant pas ponctuelle, il faut calculer les ouvertures respectives des lentilles pour réaliser cette condition. La figure 5 donne le trajet des rayons.

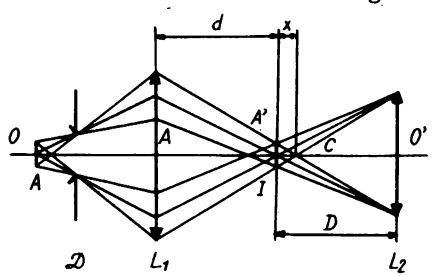


Fig. 5.- Schéma du montage optique.

$\varnothing_1$	diamètre de L_1
$\varnothing_2$	diamètre de L_2
I	hauteur de l'image
d	distance de L_1 à l'image
D	distance de L_2 à l'image
X	distance de l'image au point de concours des rayons extrêmes passant par L_1 .

Les relations suivantes :

$$\frac{2(d+X)}{\varnothing_1}=\frac{2x}{I}=\frac{2(D-X)}{\varnothing_2}$$

permettent de calculer l'optique la mieux adaptée. Remarquons que cette condition est réalisée si le diaphragme $\mathcal{D}$ et la lentille L_2 sont conjugués par L_1 , $\mathcal{D}$ ayant une ouverture telle que les rayons extrêmes soient recueillis par L_1 .

Les trois grandeurs Y_1 , Y_2 , Y_3 permettant le calcul de T_L^r peuvent être enregistrées d'une façon périodique ou continue, ces deux procédés sont décrits successivement.

ENREGISTREMENT PÉRIODIQUE DES VALEURS Y_1, Y_2 ET Y_3

Le premier système prévoit une recherche successive des valeurs à déterminer. Il y aura donc un décalage dans le temps entre le moment où l'on observe la première impulsion Y_2 et la seconde Y_3 . L'étalonnage Y_1 étant fixe n'est pas compté dans le temps d'exploration. Pour que cette mesure soit correcte, il est donc indispensable que, pendant l'intervalle de temps qui sépare l'observation de Y_2 et Y_3 , la température ou l'émissivité de la flamme n'ait pas changé. On s'aperçoit que le temps devra être d'autant plus court que les caractéristiques de la flamme varient à une fréquence plus élevée.

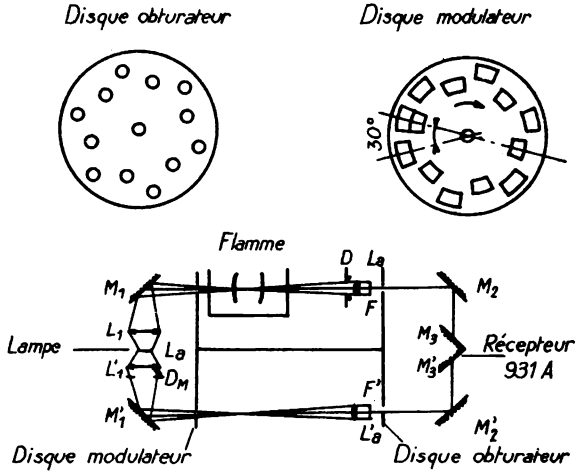


Fig. 6.- Méthode à double chemin.

La figure 6 montre un exemple de réalisation d'un appareil simple utilisable pour des flammes éclairantes. La lampe étalon L_a émet dans deux directions opposées matérialisant l'une le faisceau de référence, l'autre le faisceau de mesure. Un filtre interférentiel placé après la flamme laisse passer une bande de 150 Å environ. Les deux disques obturateurs et les miroirs de renvoi dirigent successivement sur un photomultiplicateur les trois énergies recherchées. Dans un appareil étudié pour des études de flammes de fusées, on enregistre 300 points par seconde.

D'autres appareils ont ensuite été réalisés pour faire des observations à des fréquences plus élevées, tout en travaillant sur des largeurs spectrales très étroites (quelques Å).

La figure 7 reproduit le schéma de principe du dispositif le plus récent qui permet l'étude de flammes de fusées dont le diamètre n'excède pas 27 cm. avec une fréquence de 6.000 observations par seconde.

La lampe étalon (1), dont on a relevé préalablement la courbe température de brillance/intensité, donne une image au grossissement 1, au centre de la chambre d'expérience. Cette image reprise par l'optique (4) et renversée par l'équerre (6) est dirigée sur le monochromateur à déviation constante et double traversée de prisme qui présente une dispersion élevée. La radiation monochromatique isolée est envoyée par l'optique (19) et (3) sur le photomultiplicateur (12) enfermée dans un compartiment spécial amovible. Une lampe de comparaison (15) dirige son rayonnement également sur le photo-récepteur. Le tracé du disque (13) est tel que ce dernier reçoit successivement : l'énergie monochromatique issue de (1) et après traversée de la flamme (Y_2), l énergie monochromatique de la flamme seule (Y_3) et l énergie de la lampe de comparaison, préalablement réglée à un niveau tel que les signaux provoqués par (1) et observés quand aucune flamme ne traverse la chambre de mesure, soient identiques.

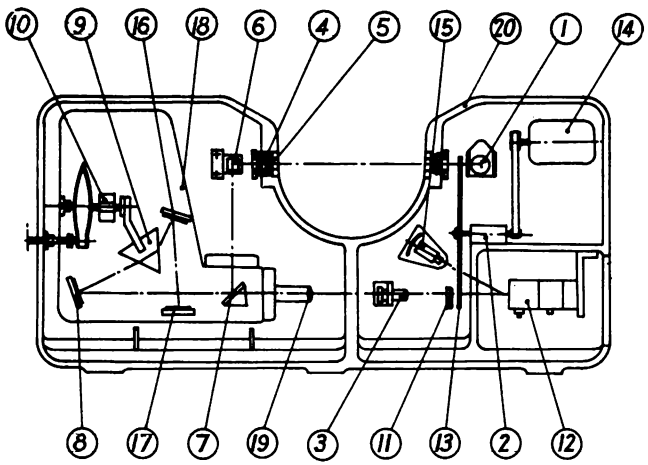


Fig. 7.- Exemple de réalisation de thermomètre électro-optique. Ce modèle permet la détermination de 4500 températures par seconde.

Donc, la lampe (15) permet de conserver la trace de la valeur Y_1 tout le long de l'enregistrement. Ceci constitue une sécurité car toutes variations dans la réponse du récepteur et de l'amplificateur qui lui fait suite seraient ainsi décelées. La bâti en alliage léger est calculé très largement pour conserver rigoureusement l'étalonnage des longueurs d'onde et l'alignement optique. Cet appareil peut être équipé d'une optique de verre, quartz ou chlorure de sodium. L'utilisation se fait de la manière suivante :

Après raccordement électrique de l'appareil au pupitre de commande qui peut être à plusieurs dizaines de mètres, on alimente le moteur au régime désiré et on met le récepteur sous tension. Si l'on fait la mesure sur une flamme non émissive, rendue éclairante par des atomes étrangers ou si l'on utilise les émissions de radicaux libres, le monochromateur est ajusté sur la bande spectrale adoptée.

Ensuite, le filament est porté à la température de brillance désirée et on règle l'intensité dans la lampe de comparaison de manière à donner sur l'enregistreur (écran d'oscillographe) des impulsions de même amplitude. On supprime le balayage horizontal de l'oscillographe et l'enregistrement est effectué avec une caméra dérouleuse.

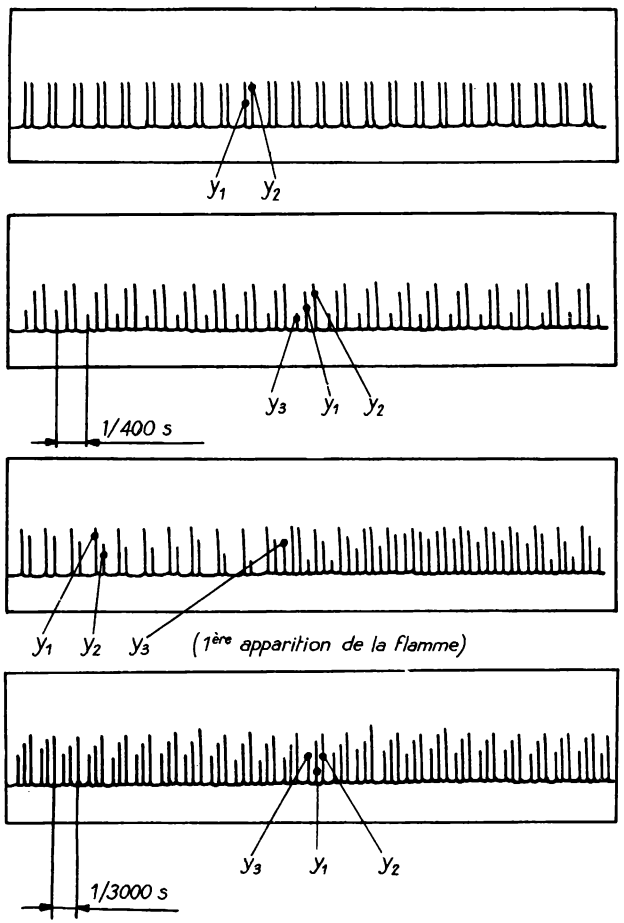


Fig. 8.- exemples d'enregistrements obtenus avec l'appareil de la figure 7 :
a) Etalonnage préalable.
b) Enregistrement d'une température de flamme stable (λ = 5.890 Å).
c) Départ d'une fusée à liquide.
d) Fonctionnement en régime stable.

Les signaux présentant un front raide, l'amplificateur doit passer environ 10 fois la fréquence fondamentale. Le câble de liaison ayant une capacité non négligeable, la résistance de charge du récepteur sera déterminée de manière à ce que la constante de temps de l'ensemble ne soit pas trop élevée. On aura tout intérêt à faire une liaison à basse impédance. La figure 8 montre la reproduction d'enregistrement relevés sur des flammes de fusées.

1ère bande.

Aspect des signaux avant interposition de la flamme. La brillance de la lampe de comparaison est ajustée jusqu'à égalisation des impulsions provoquées par la lampe étalon.

2e bande.

Flamme stable dans le temps. On voit que le filament est à une température plus basse que la flamme puisque $Y_2 > Y_1$ .Dans ce cas, par exemple, on trouve :

$$\tau = \frac{Y_3}{Y_1 + Y_3 - Y_2} = \frac{7}{21+7-24,5} = 2$$

Si le filament avait une température de brillance de 1.963° K à 5.890 Å, la température de la flamme est (d'après l'abaque de la figure 4) de 2.080°K et le coefficient d'absorption :

$$\alpha = \frac{Y_1 + Y_3 - Y_2}{Y_1} = 0,16$$

3 e bande.

Flamme instable, premières millisecondes d'un essai de fusées à liquides. A gauche de la figure, on voit les signaux de l'étalonnage dont l'impulsion due au rayonnement de la lampe étalon est déjà diminuée par l'opacité des vapeurs. Cette opacité augmente jusqu'à intercepter complètement le signal. Brusquement, la première inflammation se produit, ce qui donne le groupe d'impulsions suivantes. Ensuite, cette inflammation s'atténue pour repartir un certain nombre de fois jusqu'à l'obtention d'un régime plus stable.

4e bande.

Variations en cours de fonctionnement.

L'étude de flammes de plus grandes dimensions (fusées, chambres de combustion, ...) ne peut se faire avec les dispositifs précédents. On utilise à cette fin deux ensembles indépendants, alignés optiquement. La figure 9 montre le principe de ce dispositif. En l'absence de flamme, le photomultiplicateur délivre les

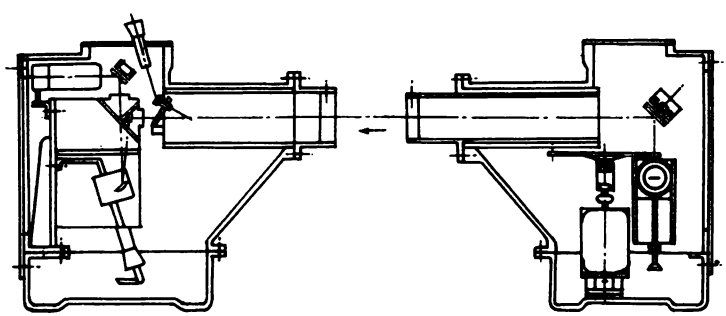


Fig. 9.- Exemple de réalisation de thermomètre électro-optique pour étude de flammes de grandes dimensions.

impulsions Y_1 (fig. 10) qui servent d'étalonnage. Lorsque la flamme apparaît, ces impulsions sont modifiées comme le montre l'enregistrement. Le niveau de base s'est élevé et représente la température de brillance de la flamme Y_3, la partie supérieure représente Y_2. On a ainsi tous les éléments pour déterminer la température et les autres caractéristiques de la flamme.

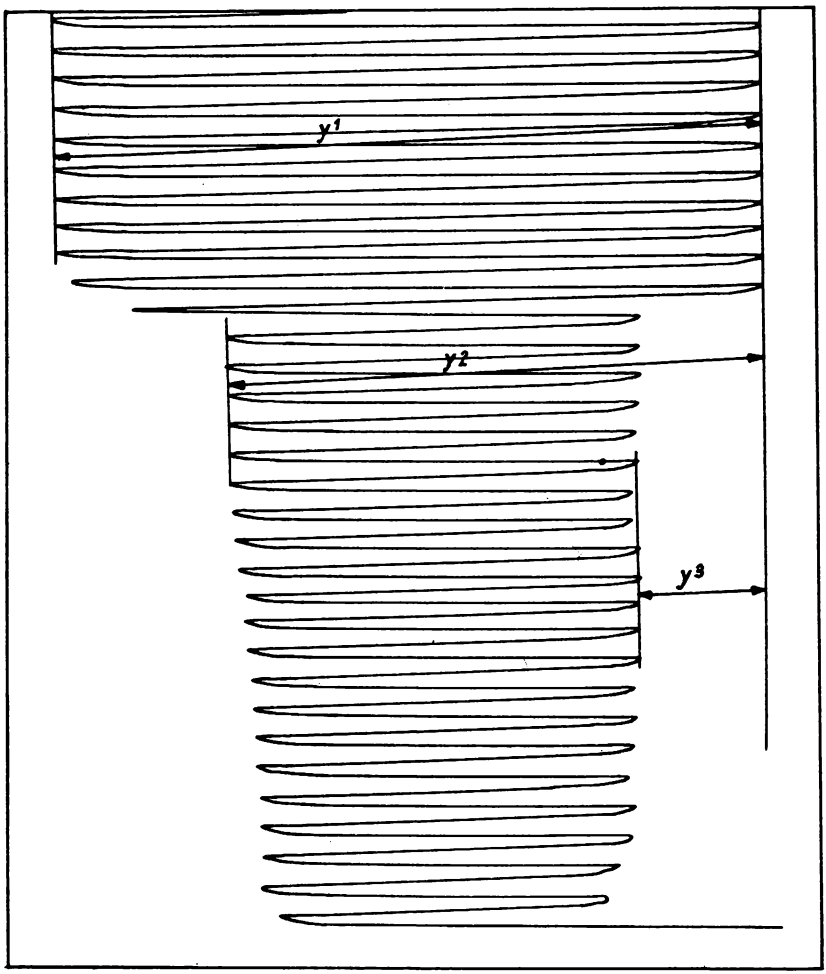


Fig. 10.- Type d'enregistrement obtenu avec le dispositif de la figure 9.

Notons que l'amplificateur électronique qui délivre les tensions au tube cathodique doit être correctement étudié pour admettre la composante continue et une bande passante élevée.

ENREGISTREMENT SIMULTANÉ DES VALEURS Y_2 ET Y_1

Les dispositifs précédents présentent l'inconvénient de mesurer Y_2 et Y_1 successivement. Il faut donc supposer qu'aucune

caractéristique de la flamme n'a varié pendant ce temps. La méthode suivante permet l'enregistrement simultané des deux valeurs utiles et le temps de réponse n'est limité que par les constantes de temps des circuits électroniques utilisés (fig 11).

L'optique L_1 donne en S' l'image du filament de la lampe S. Cette image, reprise par les lentilles L_2 et L_3, est reformée successivement dans la flamme et sur la fente d'un spectrographe ou monochromateur. L'image monochromatique obtenue, sélectionnée par la fente de sortie, est reportée par l'optique L_5 en S". Une portion de cette image X est dirigée directement sur le récepteur R_2, l'autre étant déviée vers R_1 par un miroir prismatique aluminé M. Le couteau mobile C permet d'escamoter une partie de l'image, de sorte que le récepteur R_2 reçoit la lumière de la lampe alors que R_1 est excité uniquement par le rayonnement de la flamme.

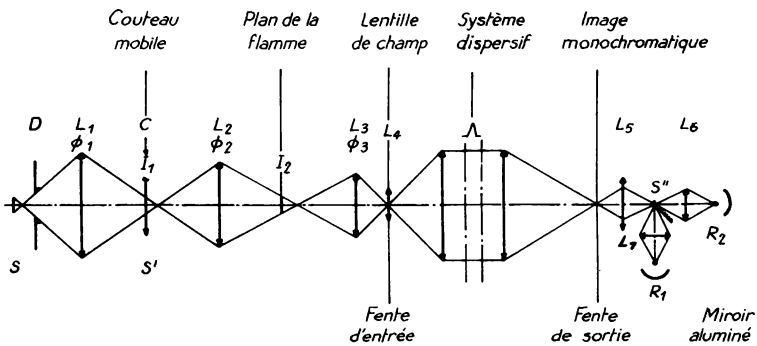


Fig. 11.- Schéma du dispositif optique pour l'enregistrement instantané de la température.

Le processus d'utilisation est le suivant :

- Le couteau C étant écarté, le filament S est porté à la température de brillance désirée. Les récepteurs R_1 et R_2 délivrent les tensions suivantes qui ne sont pas forcément égales :

$$J_1(\lambda, T_L) \longrightarrow V_1$$
$$J_2(\lambda, T_L) \longrightarrow V_2$$

Si l'on prend V_2 comme unité, il est toujours possible de modifier la tension d'alimentation du récepteur R_1, ou le coefficient d'amplification du dispositif électronique, pour avoir :

$$V_2 = K\, V_1$$

K étant un coefficient qui tient compte des différences de surfaces lumineuses étudiées, des sensibilités des récepteurs et de la réflectivité du miroir M. Il reste bien entendu que les deux parties du filament ont même brillance.

De cette manière, on obtient, à partir de deux grandeurs énergétiques inégales $J_1(\lambda, T_L)$ et $J_2(\lambda, T_L)$ deux tensions de sorties égales. Ce réglage terminé, on déplace le couteau C et on observe les spots du galvanomètre de l'oscillographe. Ces derniers étant

confondus au départ, le spot correspondant au récepteur R_1 se déplace vers l'origine qu'il atteint lorsque le couteau obture la portion de l'image déviée par le miroir M, le spot correspondant à R_2 ne bouge pas. A cet instant, le dispositif est susceptible d'enregistrer les deux paramètres Y_2 et Y_3, Y_1 étant connu à l'origine.

Le récepteur R_2 reçoit l'énergie totale :

$$\left[1-\alpha(\lambda,T_L)\right] J(\lambda,T_L)+J(\lambda,T_F)=Y_2$$

et R_1 l'énergie $K\left[J(\lambda,T_F)\right]$.

Puisque précédemment les deux récepteurs ont été réglés de manière que leurs sensibilités respectives soient dans le rapport K, tout se passe comme si le récepteur R_1 recevait l'énergie $J(\lambda,T_F)$, on peut écrire :

$$J(\lambda,T_F)=Y_1$$

Y_2 et Y_3 sont ainsi continuellement et simultanément enregistrés et le coefficient τ peut être calculé à tout instant.

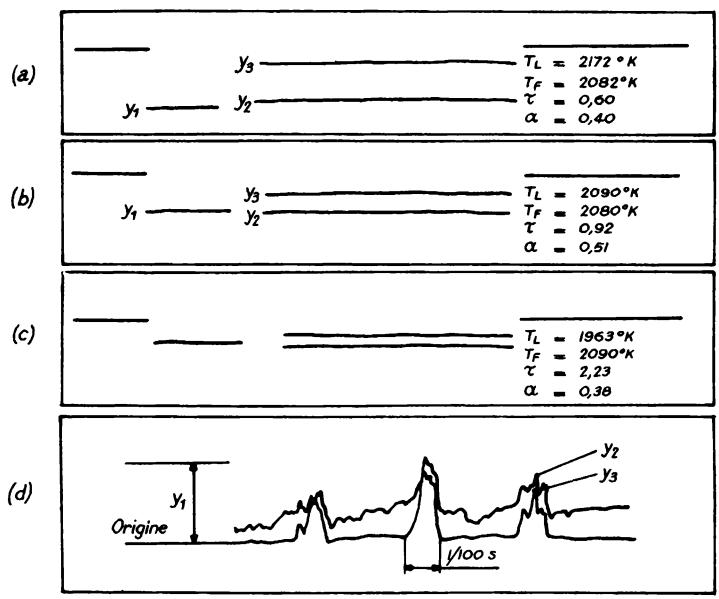


Fig. 12.- Enregistrements types obtenus avec le dispositif des figures 11 et 12.
Les bandes a) b) c) sont relatives à l'étude d'une flamme stable.
La bande d) montre l'analyse des variations de température pour plusieurs cycles de fonctionnement d'un pulso-réacteur.

La figure 12 reproduit des enregistrements obtenus :

a) sur flamme stable,

b) sur flamme variable (pulso-réacteur).

ENREGISTREMENT CONTINU DE LA TEMPÉRATURE

Les méthodes indiquées ci-dessus donnent la température instantanée d'une flamme, mais dans certaines études une valeur moyenne est suffisante.

D'une manière générale, on cherche à réaliser continuellement l'égalité entre $J(\lambda, T_L)$ et $[1-\alpha(\lambda, T_L)]+J(\lambda, T_F)$

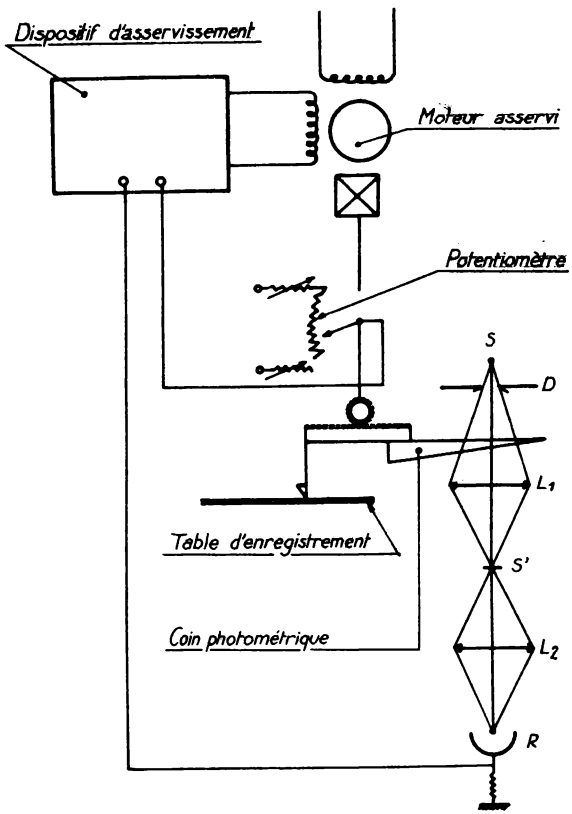


Fig. 13.- Dispositif direct de mesure de la température. Au point de renversement, les tensions relevées sur la résistance de charge du récepteur et le point courant du potentiomètre sont égales. La différence de tension entre ce point et la résistance du photorécepteur est analysée par un dispositif d'asservissement qui, par l'intermédiaire d'un moteur, déplace l'ensemble coin-potentiomètre jusqu'à ce qu'elle s'annule. Un stylet inscripteur, solidaire du coin, trace directement la courbe de température.

Plusieurs procédés ont été envisagés qui utilisent la variation de brillance de la source étalon, cette source étant asservie à la différence d'énergie $Y_1 - Y_2$. Néanmoins il est délicat de faire varier la brillance d'une source car les gradients de température du centre au bord du filament varient avec elle. Le système

suivant ne présente pas cet inconvénient et possède un temps de réponse plus faible (fig. 13). La source S est portée à la température de brillance désirée correspondant à l'émission de l'énergie $J(\lambda, T_L^e)$ qui peut être réduite à volonté par l'interposition d'un coin photométrique selon la loi :

$$\tau = \frac{J(\lambda, T_L)}{J(\lambda, T_L^e)} = \exp(-kx)$$

k = coefficient caractéristique du verre,

x = épaisseur de verre traversée.

La lentille L_1 reforme l'image de S en S' et effectue également la conjugaison du diaphragme D sur L_2, ce qui réalise la condition d'égalité des angles solides. Le récepteur R reçoit préalablement l'énergie correspondante et délivre sur sa résistance de charge une certaine tension V:

a) S'il n'y a pas de flamme en S', il reçoit la quantité :

$$J(\lambda, T_L) = J(\lambda, T_L^e) \exp(-kx),$$

ce qui détermine sur la charge du récepteur une tension V_x

b) Une flamme étant en S', l'énergie reçue devient :

$$J^t(\lambda) = \left[1 - \alpha(\lambda, T_F)\right] J(\lambda, T_L^e) \exp(kx) + J(\lambda, T_F)$$

et le récepteur donne une nouvelle tension V_x^t.

Il y a donc une différence de tension $V_x^t - V_x = \Delta V$ qui s'annule pour une position du coin telle que la température de brillance réduite, égale la température vraie de la flamme.

La recherche de cette condition est faite par un dispositif donnant une tension de même loi que celle engendrée par le récepteur lors du déplacement du coin photométrique, en l'absence de toute flamme et l'opposant à la tension fournie par le récepteur en présence d'une flamme. Cette recherche peut être faite avec une seconde cellule mais nous préférons utiliser un potentiomètre dont la loi de variation, en fonction de l'angle θ, est :

$$V_\theta = A \exp(-B\theta),$$

tension qui peut être maintenue constante avec une grande précision.

De cette manière, en égalisant les tensions aux bornes d'entrée et de sortie du potentiomètre au niveau de celles du récepteur pour les deux portions extrêmes du coin, on a à tout moment en l'absence de flamme :

$$V_\theta = V_x.$$

Le coin photométrique et le potentiomètre sont reliés mécaniquement.

Si une flamme est placée en S', la tension V_x devient V_x^t et comme V_θ est inchangé, puisqu'il reste toujours égal à V_x, il existe entre le curseur et la charge du récepteur une tension. Celle-ci est utilisée pour déclencher un asservissement qui dé-

place l'ensemble (coin + potentiomètre) dans un sens tel que l'écart de tension s'annule. Un stylet solidaire du coin par exemple, inscrira directement la courbe de température.

RÉALISATION PRATIQUE ET UTILISATION

Cet ensemble a été réalisé en deux blocs séparés. Le premier contient la lampe étalon et l'ensemble mobile coin+potentiomètre avec le dispositif d'asservissement. La lampe et l'objectif ont les tirages nécessaires pour former une image dans une flamme située dans un intervalle de 1 mètre à 5 mètres de l'appareil. Le deuxième bloc renferme le monochromateur et le récepteur photoélectrique. Les tensions issues du récepteur et du potentiomètre sont dirigées vers un bloc contenant le dispositif électronique d'asservissement.

Un étalonnage préalable de la brillance de la lampe étalon vue à travers le coin est effectué pour les deux positions extrêmes de ce dernier. Le déplacement du coin est proportionnel à l'inverse de la température et le papier enregistreur doit être gradué directement en 1/T.

Cet appareil présente les possibilités suivantes :

- Examen des températures de flammes de toutes dimensions.
- Enregistrement direct de la courbe température/temps avec une bande passante de 10 cycles/seconde.
- Possibilité, l'asservissement étant hors service, de mesurer la température avec une fréquence de 4.500 pointés/seconde au moyen d'un procédé déjà décrit (fig. 9) et incorporé dans l'appareil.

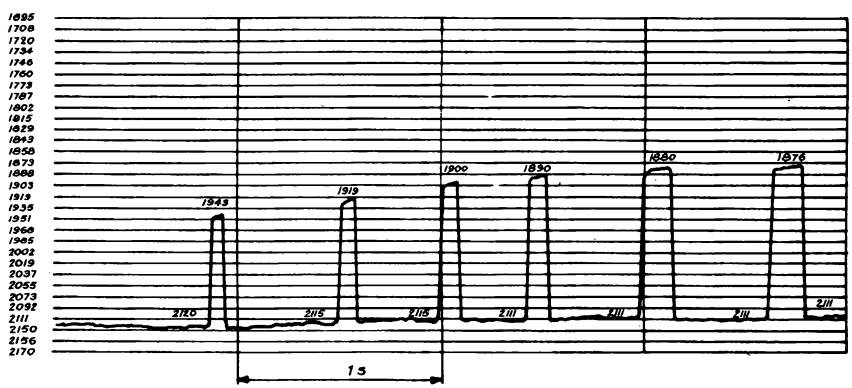


Fig. 14.- Enregistrement type obtenu avec le dispositif de la figure 13.

La figure 14 donne un exemple d'enregistrement obtenu avec ce dispositif (flamme d'hydrocarbure colorée avec du sodium). En obtenant le faisceau de la lampe étalon, on peut enregistrer à volonté la valeur de la température de brillance ou de la température vraie. Dans cet exemple, on voit que la température de brillance diminue avec le coefficient d'absorption tandis que la température vraie est inchangée.

CONCLUSION

Les méthodes de mesure des températures des flammes ont, ces dernières années, évolué d'une manière importante. Les perfectionnements considérables apportés aux dispositifs électroniques ainsi qu'aux récepteurs de rayonnement ont rendu possible le développement de dispositifs de mesure et d'enregistrement instantanés avec une précision accrue.

Les procédés utilisés pour ces déterminations doivent autant que possible réunir les conditions suivantes :

- Simplicité de mise en œuvre,
- Absence de pertubation de la combustion,
- Faible valeur du temps de réponse pour suivre les fluctuations.

Le choix de la méthode à adopter dépend étroitement de la nature des résultats recherchés. Selon que l'on aura à déterminer des températures relativement basses (1.273°K) ou plus élevées (3.500°K) avec des temps de réponse longs ou courts, on emploiera les thermocouples ou les procédés optiques.

Pour les températures inférieures à 1.000°C les thermocouples conviennent parfaitement et dans le cas d'écoulements gazeux à grande vitesse, la sonde à aspiration est employée avec succès. De 1.000 à 1.800°C, on a le choix entre les moyens précédents et les procédés optiques, avec toutefois une préférence pour les premiers. Au-delà, les thermomètres électro-optiques sont presque exclusivement utilisés. D'une manière générale, les thermocouples et sondes à aspiration sont d'un maniement simple et ne demandent qu'un minimum de matériel. Les indications traduisent bien la température thermodynamique du fluide étudié et, dans le cas où des températures exagérément élevées ou des vitesses gazeuses trop importantes ne mettent pas en danger la vie de la sonde, les résultats sont dignes de confiance.

Les procédés électro-optiques peuvent davantage être considérés comme des moyens de recherches. Aptes à fonctionner à partir de 700°C (et au-dessous en utilisant le rayonnement infrarouge) ils n'ont pratiquement pas de limite supérieure. Leur aptitude à suivre toutes les variations instantanées, en font des moyens d'études particulièrement utiles. En contrepartie, leur mise en oeuvre est plus complexe, bien que des difficultés aient été surmontées ces dernières années. Ils permettent également l'exploration de domaines particuliers autres que la température thermodynamique (températures de rotation, vibration et électronique). Tout dépend du choix des longueurs d'ondes utilisées et des émetteurs employés comme sources de rayonnement.

Les méthodes exposées montrent, par leur diversité, la complexité du problème de mesure des hautes températures. Cette dernière est autant d'ordre théorique qu'expérimental et le dispositif idéal qui permettrait de répondre à toutes les demandes n'existe pas encore. En fait, c'est le problème posé qui détermine le choix du type de méthode à employer.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages fondamentaux

RIBAUD : Traité de Pyrométrie Optique.

Editions de la Revue d'Optique Théorique et Instrumentale, 1931.

A.G. GAYDON and H.G. WOLPHARD : Flames, their structure, radiation and temperature, Chapman and Hall, London 1953.

A.G. GAYDON : Spectroscopy and Combustion Theory. Chapman and Hall, London 1948.

LEWIS, B et VON ELBE, G. : Combustion, flames and explosions of gases. Academic Press Inc. New-York 1951.

Périodiques

Revue d'Optique

The Journal of Chemical Physics.

Journal of the American Rocket Society.

Journal Optical Society of America.

CINQUIÈME CHAPITRE

LES TECHNIQUES GÉNÉRALES DU LABORATOIRE D'OPTIQUE

par

A. ARNULF

Professeur à la Faculté des Sciences de Paris

LES TECHNIQUES GÉNÉRALES DU LABORATOIRE D'OPTIQUE

LES MATÈRIAUX UTILISÉS EN OPTIQUE 233
Constantes caractéristiques d'une matière 233
Verre d'optique 235
Cristaux naturels et artificiels 238
Verres organiques 242
Air sec et dépourvu de gaz carbonique 243
Liquides et colles utilisés en optique 244
Matériaux polarisants 246
Notions sur les défauts de la matière 247
Les surfaces optiques 250
Réflexion de la lumière par les surfaces 251
Défauts de polissage et altération des surfaces 255
Nettoyage des surfaces optiques 257

LES ÉLÉMENTS DES SYSTÈMES OPTIQUES 258
Pièces d'optique courante du commerce 259
Optique de précision 260
Construction de systèmes spéciaux 265
Construction de systèmes de qualité courante 268

CHOIX ET USAGE DES INSTRUMENTS D'OPTIQUE 270
Instruments visuels à oculaires 270
Instruments photographiques 273
Instruments de projection 274
Usage des instruments 275
Mise au point des instruments visuels 279
Mise au point d'un appareil photographique 282
Usage du microscope 283
Utilisation pour l'ultra-violet ou l'infra-rouge d'un instrument dioptrique corrigé visuellement 286

LES MONTAGES OPTIQUES EN LABORATOIRE 287
Instruments auxiliaires fondamentaux 287
Réglage du banc optique 290
Réglage de système sans banc optique 294
Réglage d'une chambre photographique ou d'un dispositif de projection à usage métrologique 296
Dispositifs particuliers 297

CINQUIÈME CHAPITRE

LES TECHNIQUES GÉNÉRALES DU LABORATOIRE D'OPTIQUE

Cet exposé concerne le domaine des radiations électromagnétiques dites "optiques" que nous limiterons du côté des courtes longueurs d'onde, à 0,185 μ (limite de transparence de l'air) et du côté des grandes longueurs d'onde à 20 μ (limite de transparence des substances susceptibles de transmettre le rayonnement émis par les corps à la température ordinaire).

LES MATÉRIAUX UTILISÉS EN OPTIQUE

CONSTANTES CARACTÉRISTIQUES D'UNE MATIÈRE

Les propriétés optiques d'une matière sont définies par :
- l'indice de réfraction et la dispersion :
- le coefficient de température de l'indice et le coefficient de dilatation;
- l'absorption :

Indice de réfraction et dispersion.

Une matière est caractérisée par sa courbe de dispersion. Il est utile de savoir comment les données correspondantes sont fournies par les catalogues de verres d'optique. Les mesures se rapportent à une série de longueurs d'onde conventionnelles, appartenant toutes au spectre visible, et figurant dans le tableau I.

Les catalogues fournissent les quantités suivantes :
- Indices pour les radiations du tableau I.
- Dispersion moyenne $n_F - n_C$.
- Coefficient de dispersion ou constringence ν .
- Dispersions partielles, différences entre les indices pour deux radiations consécutives.
- Rapports de dispersion, rapports des dispersions partielles à la dispersion moyenne.

TABLEAU I. - LONGUEURS D'ONDE CONVENTIONNELLES POUR LES MESURES D'INDICES DANS LE SPECTRE VISIBLE .

Désignation des raies	A' (1)	C	D (1)	E
Corps émetteur	Potassium	Hydrogène	Sodium	Mercure
Longueur d'onde (Å)	7682	6563	5893	5461
Désignation des raies	F	G' (3)	H (2)	
Corps émetteur	Hydrogène	Hydrogène	Mercure	
Longueur d'onde (Å)	4861	4341	4047	

(1) Doublet, les mesures concernent la longueur d'onde moyenne.

(2) Doublet, H est la raie la plus intense.

(3) On effectue souvent les mesures sur la raie G du mercure $\lambda = 4359$ Å. beaucoup plus intense que G', et on interpole, si besoin est, l'indice pour G'.

Ces deux dernières quantités donnent l'allure de la dispersion dans l'ensemble du spectre visible.

Les règles adoptées pour les verres à l'intérieur du domaine visible sont admises actuellement pour les autres substances.

En dehors du spectre visible, il n'existe pas de longueurs d'onde conventionnelles pour la mesure des indices. Pour l'ultraviolet, le mercure et l'hélium fournissent des longueurs d'onde bien réparties. Pour l'infrarouge photographique, on peut utiliser l'argon, les raies 10 139,75 et 13 570,60 Å de Hg, le doublet 10 830,32 - 10 829,11 Å de He.

Pour l'infrarouge plus lointain, on peut employer les raies 15 295,25 Å de Hg, 20 581,2 de He, la flamme du bec Bunsen, la flamme du sulfure de carbone, les maxima et les minima de transmission de la vapeur d'eau, qui sont bien définis.

Le spectre cannelé produit par un étalon interférentiel de Fabry et Pérot d'épaisseur connue fournit des repères de longueurs d'onde définis avec précision, qui peuvent rendre de grands services dans l'infrarouge.

Coefficient de température de l'indice $\frac{\Delta n}{\Delta \theta}$

C'est la variation de l'indice de réfraction consécutive à une variation de température de 1°C. Cette donnée est indispensable pour prévoir l'effet des changements ou des inégalités de température.

Coefficient de dilatation α.

α est l'allongement en centimètres, pour une longueur de 1 cm., produit par une élévation de température de 1°C. Il intervient pour la prévision des déformations des surfaces sous l'action des inégalités ou des variations de la température.

Absorption.

Sauf indications contraires, nous fournissons les valeurs du facteur de transmission (rapport de l'intensité réduite par la traversée du milieu à l'intensité incidente) pour une épaisseur de 10 cm. de matière traversée. Les valeurs numériques ne tiennent pas compte des pertes de lumière par réflexion sur les surfaces (voir p.).

VERRE D'OPTIQUE

Les verres d'optique se répartissent en un certain nombre de types, dont les propriétés optiques varient en fonction de la concentration et de la nature de leurs composants chimiques. Il faut savoir que les valeurs absolues des indices figurant sur les catalogues des verriers sont susceptibles de variations de plusieurs unités de la 3° décimale, suivant la fonte et l'état de recuisson du verre. Les calculs d'optique définitifs doivent toujours être effectués à partir des mesures faites par le verrier sur les échantillons qui seront définitivement utilisés, mesures consignées sur une feuille d'indices qui accompagne la livraison

TABLEAU II. - INDICES DE RÉFRACTION ET DISPERSION DES VERRES D'OPTIQUE.
Les deux nombres figurant pour chaque type de verre correspondant aux valeurs extrêmes.

Type	nD	F-C	ν	A'-C	D-C	e-D	F-e	G'-F	405-G'
Fluor crown	1,46 1,49	0,00713 0,0079	68 65	0,00260 0,00265	0,00213 0,00219	0,00178 0,00180	0,00322 0,00329	0,00395 0,00402	0,00295 0,00313
Borosilicate crown	1,49 1,52	0,0076 0,0082	67 64	0,0027 0,0029	0,0023 0,0025	0,0019 0,00205	0,0034 0,0037	0,0042 0,0046	0,0031 0,0035
Crown	1,50 1,535	0,0082 0,0096	61 56	0,0029 0,0034	0,0024 0,0028	0,0020 0,0024	0,0037 0,0044	0,0046 0,0055	0,0035 0,0043
Baryum crown léger	1,54 1,58	0,0090 0,00103	60 56	0,0031 0,0035	0,0026 0,0030	0,0022 0,0030	0,0041 0,0047	0,0050 0,0059	0,0038 0,0045
Baryum crown dense	1,59 1,62	0,0096 0,0109	61 55	0,0034 0,0038	0,0028 0,0032	0,0024 0,0028	0,0044 0,0051	0,0054 0,0064	0,0041 0,0049
Crown haute dispersion	1,51 1,54	0,0095 0,00108	54 50	0,0033 0,0037	0,0028 0,0032	0,0024 0,0027	0,0043 0,0050	0,0054 0,0063	0,0042 0,0049
Flint baryte léger	1,54 1,59	0,0101 0,0110	55 52	0,0035 0,0037	0,0030 0,0032	0,0025 0,0028	0,0047 0,0051	0,0058 0,0066	0,0045 0,0050
Baryum crown très dense	1,61 1,64	0,0113 0,0120	55 51	0,0038 0,0042	0,0033 0,0036	0,0028 0,0030	0,0052 0,0057	0,0064 0,0072	0,0049 0,0055
Flint baryte	1,56 1,66	0,0107 0,0147	54 44	0,0036 0,0048	0,0031 0,0042	0,0026 0,0037	0,0052 0,0057	0,0064 0,0087	0,0047 0,0055
Flint léger	1,57 1,60	0,0130 0,0149	43 40	0,0043 0,0049	0,0038 0,0043	0,0032 0,0037	0,0060 0,0070	0,0077 0,0090	0,0061 0,0071
Flint dense	1,60 1,64	0,0151 0,0181	39,5 35	0,0049 0,0058	0,0043 0,0051	0,0037 0,0045	0,0071 0,0085	0,0091 0,0110	0,0071 0,0087
Flint baryte dense.	1,60 1,66	0,0144 0,0183	42 36	0,0047 0,0058	0,0041 0,0052	0,0035 0,0045	0,0067 0,0086	0,0086 0,0111	0,0068 0,0088
Flint extra dense..	1,65 1,79	0,0190 0,0312	34 25	0,0060 0,0094	0,0054 0,0087	0,0051 0,0077	0,0089 0,0148	0,0116 0,0198	0,0093 0,0163
Verres Kodak	1,80 à 2 1,70 à 1,75		42 à 19 50 à 45						
Glace St-Gobain ..	1,527		59,2						

du verre. La précision des résultats y figurant peut être estimée à $\pm 5 \times 10^{-5}$ pour la valeur absolue des indices, et à $\pm 2 \times 10^{-5}$ pour les dispersions.

Le tableau II fournit la liste des verres existants, avec leurs caractéristiques limites. Nous y avons joint les données relatives à la glace de Saint-Gobain, matière première à bas prix et d'une qualité suffisante pour beaucoup d'applications, à la seule condition qu'aucun rayon ne fasse avec la normale aux surfaces primitives de la glace un angle supérieur à 45° (voir p.).

Le graphique de la figure 1, portant en abscisses les coefficients de dispersion, et en ordonnées les indices pour la radiation D du sodium, représente les principaux verres d'optique appartenant aux diverses familles, ainsi que d'autres matériaux courants

Il convient de remarquer que l'extrapolation des indices par les formules classiques ne permet pas d'obtenir des valeurs correctes en dehors du spectre visible. En ce qui concerne l'infrarouge, la courbe de dispersion des verres change d'allure vers $0,9 - 1\mu$. Les verres possédant la plus forte dispersion dans le visible ne sont pas nécessairement les plus dispersifs dans l'infrarouge.

Coefficient de température de l'indice de réfraction $\frac{\Delta n}{\Delta \theta}$ et de la dispersion $\frac{\Delta D}{\Delta \theta}$.

Ces coefficients sont, en général, très faibles. Les ordres de grandeur figurant dans le tableau III suffiront dans la plupart des cas.

TABLEAU III

	$\Delta n/\Delta\theta$	$\Delta D/\Delta\theta$
Crowns	10^{-6}	10^{-6}
Flints d'indice inférieur à 1,62 ..	2 à 3×10^{-6}	10^{-6}
Flints très denses jusqu'à n = 1,85.	10^{-5}	5×10^{-6} limite sup.

Pour tous les verres, ces quantités sont positives (l'indice augmente avec la température).

Coefficients de dilatation.

Il n'est pas possible de fournir autre chose que des ordres de grandeur, parce que les coefficients de dilatation sont très variables, même pour des verres d'un même type. Il faut, dans chaque cas particulier, consulter le verrier. Les valeurs extrêmes varient entre 4,5 et 10×10^{-6}, les plus fréquentes sont comprises entre 8 et 9×10^{-6} et se répartissent sensiblement au hasard entre les divers types. Le Pyrex, utilisable seulement pour la construction des miroirs, a un coefficient de $3,3 \times 10^{-6}$.

Transparence.

Allure générale.- Si l'on excepte les verres au baryum et les flints lourds, le facteur de transmission par centimètre des

verres d'optique modernes est supérieur à 99 % pour le spectre visible. Il descend rarement au-dessous de 98 %.

Les limites de transmission dans l'ultraviolet se situent entre 0,38 μ et 0,36 μ , sauf pour les flints très denses où cette limite est ramenée vers 0,4 μ. Les borosilicates crowns et les crowns sont plus transparents que les flints. Les verres dits "uviols" ont une limite de transparence située vers 0,32 μ à 0,33 μ.

Dans l'infrarouge, les flints sont plus transparents que les crowns, la limite variant entre 2,5 μ et 3,5 μ.

Valeurs numériques. - Les valeurs de la transparence sont considérablement affectées par des traces d'impuretés. Il n'est pas possible de prévoir, à priori, la transparence d'un verre déterminé.

Le tableau suivant fournit quelques valeurs numériques relatives au spectre visible et au début de l'ultraviolet.

TABLEAU IV. - TRANSPARENCE DANS LE VISIBLE ET LE DÉBUT DE L'ULTRA-VIOLET
Facteurs de transmission pour une épaisseur de 10 cm.

Type	Indices	λ = 3650	λ = 4358
Borosilicate crown ..	1.51	0.84	0.945
Baryum crown	1.61	0.71	0.82
Flint léger	1.58	0.55	0.92
Flint dense	1.62	0.48	0.95
Flint extra-dense ...	1.74	0.00	0.61
Type		λ = 4916	λ = 5460	λ = 5790
Borosilicate crown ..		0.964	0.976	0.976
Baryum crown		0.918	0.934	0.920
Flint léger		0.95	0.98	0.976
Flint dense		0.88	0.97	0.97
Flint extra-dense ...			0.95	0.95

Les données que nous avons pu trouver relatives à l'ultraviolet sont trop anciennes pour être utiles. Il faudra effectuer des mesures dans chaque cas particulier.

TABLEAU V. - TRANSPARENCE DANS LE ROUGE ET L'INFRAROUGE

Facteurs de transmission pour une épaisseur de 10 cm.

Types	Indice	ν	Longueurs d'onde en microns					
			0.68	0.80	1.01	2.10	3.03	3.03 (1cm)
Borosilicate	1.500	61	0.96	0.96	0.94	0.46	0.019	0.67
Baruym crown léger ...	1.574	57	0.93	0.93	0.93	0.51	0.017	0.66
Baryum crown dense...	1.590	60	0.82	0.82	0.77	0.58	0.007	0.61
Baryum crown dense...	1.609	59	0.90	0.85	0.75	0.70	0.032	0.71
Crown	1.528	52	0.96	0.96	0.95	0.66	0.006	0.60
Crown	1.530	51	0.94	0.90	0.88	0.47	0.030	0.69
Flint baryte	1.580	54	0.86	0.86	0.86	0.61	0.017	0.66
Bar. crown très dense .	1.617	54	0.78	0.78	0.72	0.58	0.032	0.71
Flint extra-léger	1.541	48	0.98	0.95	0.95	0.44	0.011	0.63
Flint baryte	1.581	46	0.76	0.80	0.77	0.55	0.18	0.85
Flint dense	1.630	38	0.82	0.79	0.76	0.59	0.15	0.83
Flint extra-dense.....	1.754	27	0.91	0.93	0.91	0.69	0.18	0.84

La dernière colonne fournit la valeur du facteur de transmission pour la longueur d'onde 3 μ 03 et pour 1 cm de verre traversé.

Une lampe à incandescence poussée fournit encore, à travers le verre de son ampoule, une quantité d'infrarouge appréciable à 5μ.

Nous insistons sur le fait que les données relatives à l'absorption concernent des fontes de verre déterminées, et peuvent varier notablement d'une fonte à l'autre. Il est indispensable, spécialement lorsqu'on doit travailler au voisinage de la limite de transparence d'un verre, d'effectuer des mesures préalables sur la matière qui sera effectivement utilisée.

CRISTAUX NATURELS ET ARTIFICIELS

Les cristaux naturels utilisés le plus souvent sont le quartz, le spath, la fluorine, le sel gemme. Les cristaux artificiels comprennent actuellement les fluorures de lithium, de sodium et de calcium, ce dernier ayant les mêmes propriétés que la fluorine naturelle, mais sans défaut d'homogénéité, le nitrate de sodium, le corindon artificiel auxquels on peut adjoindre la silice fondue ou verre de silice. Voici quelques indications sur ces différentes matières.

Quartz.

Cristal uniaxe au point de vue optique, doué de pouvoir rotatoire, se présentant en principe sous la forme de prismes hexagonaux terminés par une pyramide à six faces. On trouve également dans le commerce des morceaux informes, provenant de gros cristaux cassés ou roulés par les eaux.

Nous déconseillons aux travailleurs de laboratoire de procéder à des achats de quartz sans avoir fait préalablement examiner les cristaux par un laboratoire spécialisé. La pureté des formes

et la transparence ne sont pas des indices de qualité. On notera que la base d'implantation des cristaux est toujours mauvaise, ce qui entraîne une perte de matière importante. C'est dans la partie centrale et la pointe qu'on trouve les meilleurs morceaux. Les cristaux roulés informes sont, en général, de bonne qualité (le coeur seul subsiste), bien que souvent les constructeurs les rejettent, par suite des difficultés de la recherche de l'axe optique.

Avant 1939, plusieurs maisons d'importation étaient spécialisées dans la vente du quartz, qui fait l'objet d'un commerce important en dehors des applications à l'optique.

Silice fondue.

Corps isotrope, se présentant sous l'aspect d'un verre avec une très belle transparence. Elle présente des défauts d'homogénéité importants à structure granulaire, étendus à toute la masse, souvent accompagnés de fils. Pour les meilleurs échantillons, ces défauts introduisent des différences de marche de quelques dixièmes d'onde pour une épaisseur traversée de 1 cm., dont la construction de précision peut souvent s'accomoder.

Spath.

Devenu presque introuvable, il en reste quelques beaux échantillons dans les laboratoires.

Fluorine.

Corps isotrope, se présentant sous la forme de petits cubes. On peut trouver assez facilement des cristaux utilisables, de l'ordre du centimètre cube ou plus petits. Les pièces de dimensions plus grandes sont très rares. Sa dureté est très faible, ce qui rend la taille de précision difficile et les surfaces fragiles. Toutes les fois que c'est possible, il faut protéger les surfaces (par exemple en collant une lentille de fluorine entre deux lentilles de verre). Il faut prendre garde que certains échantillons, même ne possédant pas de coloration sensible, ont une très mauvaise transparence pour l'ultraviolet. On fabrique actuellement en Amérique des cristaux de fluorine artificielle de grandes dimensions (par exemple en cylindre de 100 mm. de diamètre et de hauteur équivalente).

Sel gemme.

Le sel gemme est un corps isotrope, que l'on peut trouver en très gros cristaux. Il est très tendre et hygroscopique, ce qui rend sa taille difficile et la conservation des surfaces optiques précaire. Il se clive par suite d'échauffements locaux, même faibles, d'autant plus facilement que les pièces manipulées sont plus massives.

Le sel gemme artificiel possède les mêmes propriétés que le naturel; les échantillons possédant des tensions internes (révélées par la biréfringence) sont inutilisables parce que se clivant à la taille ou même spontanément, malgré toutes les précautions thermiques qu'on peut prendre.

Fluorures de lithium et de sodium.

Ces cristaux artificiels sont fabriqués industriellement dans divers pays. Ils possèdent des propriétés optiques voisines de la fluorine, sont aussi tendres, et résistent moins bien à l'humidité. Les échantillons possédant des tensions se clivent avec la plus grande facilité et ne sont pas utilisables.

Corindon artificiel.

La fabrication de ce corps a fait, au cours de ces dernières années, d'assez grands progrès pour qu'on puisse l'utiliser en optique de précision. Cependant, les meilleurs échantillons présentent encore des défauts d'homogénéité, à structure granulaire,

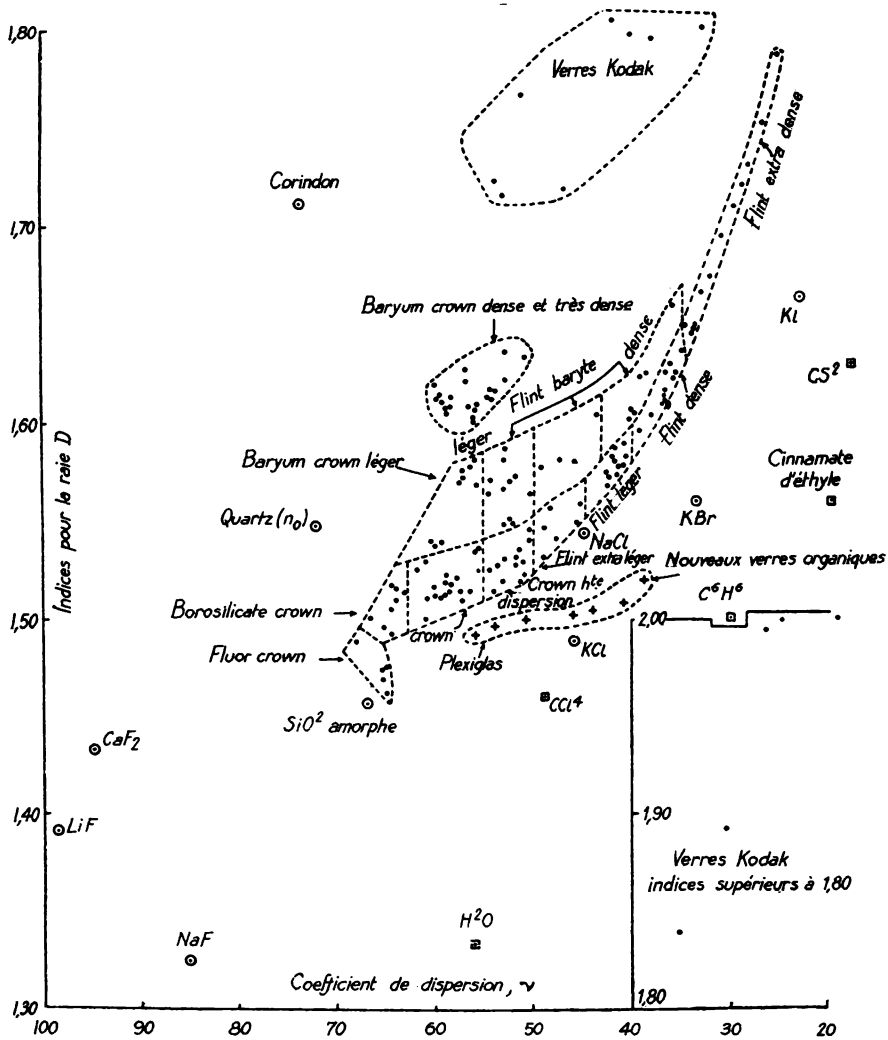


Fig. 1. - Indice et dispersion des produits courants.

susceptible d'introduire des différences de marche de 1/10 d'onde de la lumière visible sur une épaisseur de 1 cm. De plus, ils sont faiblement biréfringents. Sa taille est difficile par suite de sa grande dureté.

Nitrate de sodium.

Cristal uniaxe, possèdant des indices très différents, très tendre et hygroscopique, difficile à travailler, et dont les surfaces doivent être protégées. Sa fabrication se développe en vue de remplacer le spath, en particulier pour les polariseurs.

Valeurs numériques.

TABLEAU VI. - INDICES ET DISPERSION DES CRISTAUX COURANTS

	Fluorine	Na Cl	K Cl	Silice amorphe	Quartz		Spath	
					n_o	n_e	n_o	n_e
n_D	1,4338	1,5443	1,4903	1,4584	1,54424	1,55335	1,65837	1,48643
ν	95	42,9	43,9	67	72		49	

On trouvera les indices de réfraction relatifs aux diverses radiations infrarouges visibles et ultraviolettes dans le recueil des Constantes de la Société Française de Physique.

Le point représentatif de ces diverses substances a été figuré sur le graphique de la figure I.

Le tableau VII fournit quelques valeurs des indices de réfraction relatifs aux cristaux artificiels.

TABLEAU VII. - INDICES ET DISPERSION DES CRISTAUX ARTIFICIELS

	ν	D	30.000	20.000	10.000
Corindon	73,7	1,71276			
Nitrate de sodium artificiel		n_o = 1,5852 n_e = 1,3348			
Fluorure de lithium	98,5	1,3921	1,36651	1,37876	1,38718
Fluorure de sodium	85,2	1,3255			
Bromure de potassium	33,6	1,5601			
Iodure de potassium	23,5	1,6664			

	C	F	G	3663,1	2803,5
Corindon	1,70983	1,71950	1,72484		
Nitrate de sodium artificiel					
Fluorure de lithium	1,39088	1,39483	1,39684	1,40121	1,41188
Fluorure de sodium	1,32436	1,32818	1,33025	1,33482	1,34645
Bromure de potassium	1,55821	1,57189	1,58160		
Iodure de potassium	1,6582	1,6866	1,7036		

Les valeurs obtenues pour Na Cl et K Cl sont en bon accord avec les mesures effectuées sur les cristaux naturels, auxquelles on se reportera.

Pour les substances utilisées dans l'infrarouge, il existe des régions du spectre pour lesquelles la dispersion est considérablement réduite. On évitera, pour des mesures précises, d'utiliser des prismes de quartz vers 1,3 μ de fluorine vers 1,7 μ, du sel gemme vers 2,7 μ .

VERRES ORGANIQUES

Il s'agit de matières plastiques transparentes, dont l'étude est poussée activement dans divers laboratoires. Bien qu'elles n'aient actuellement que peu d'applications optiques, nous croyons utile de donner quelques renseignements sur leurs propriétés. Ces substances présentent par rapport aux verres l'avantage d'une transparence remarquable dans le visible, avec des limites de transparence infrarouge et ultraviolette que l'on peut estimer à 5μ et à 0,3μ. Elles présentent par contre l'inconvénient de posséder une dilatation et un coefficient de température de l'indice au moins 16 fois plus forts que les verres. De plus, leurs propriétés optiques sont difficilement reproductibles avec précision.

Nous ne fournirons ici que les caractéristiques de produits dont la fabrication est assez sûre et constante pour qu'ils puissent être effectivement utilisés.

TABLEAU VIII

	C	D	F	ν
Indices de réfraction du métacrylate de méthyle	1.4904	1.4930	1.4990	56

En lui incorporant divers produits, M. Boutry a obtenu une série de verres organiques d'indices peu variables, mais de dispersions très différentes et n'ayant pas d'équivalents parmi les verres minéraux. On en trouvera quelques données dans le tableau IX

TABLEAU IX

C	D	F	ν
1.4940	1.4967	1.5032	54
1.4977	1.5006	1.5076	51
1.4997	1.5026	1.5106	46
1.5016	1.5047	1.5131	44
1.5059	1.5092	1.5184	41
1.5158	1.5204	1.5292	39

La position de ces verres organiques est figurée sur le graphique de la figure I. (Coefficients de dilatation voisins de 80×10^{-6})

AIR SEC ET DÉPOURVU DE GAZ CARBONIQUE.

Indice de réfraction à 0° et 76 cm. de mercure, pour la raie D de sodium :

$$n_D = 1,000293$$

Dispersion à 0° et 75 cm. de mercure, dans l'intervalle 0,3μ - 0,8μ :

$$n - 1 = 28,79 \times 10^{-5} \left(\frac{1 + 5,67 \times 10^{-11}}{\lambda^2} \right)$$

λ étant exprimée en centimètres .

Variation avec la température et la pression.- Formule valable en toute rigueur pour les variations de la température et de la pression rencontrées dans la nature; peut être utilisée jusqu'à + 500° en ce qui concerne la température.

$$n' - 1 = (n - 1) \frac{p'}{p} \times \frac{1 + 0,00367.\theta}{1 + 0,00367.\theta'}$$

n et n' = indices de réfraction, pour les températures θ et θ' et les pressions p et p'.

Vapeur d'eau à 0° et 76 cm. de mercure :

$$n_D = 1,000\ 257 .$$

L'action de la vapeur d'eau sur l'indice de l'air se calculera par la règle des mélanges : la réfraction n - 1 d'un mélange de gaz est égale à la somme des réfractions de chacun des gaz à la pression qu'il aurait s'il occupait seul le volume total.

Notions sur l'absorption atmosphérique.

L'absorption par la basse atmosphère sans brume est due à plusieurs causes : diffusion moléculaire et par les gros ions et absorption par les gaz de l'atmosphère. Pour l'ultraviolet, il y a absorption par l'oxygène et la petite quantité d'ozone contenue dans la basse atmosphère. Sur un trajet de l'ordre du mètre, la limite de transparence dans l'ultraviolet est située vers 1850 Å (bandes d'absorption de l'oxygène). Dans l'infrarouge, il y a absorption par la vapeur d'eau, dont les bandes les plus importantes sont bien marquées sur un trajet de quelques mètres d'air et par le gaz carbonique.

Le nuage d'ozone qui entoure la terre à une altitude voisine de 25 kilomètres absorbe toutes les longueurs d'onde inférieures à 3 000 Å provenant des sources extra-terrestres (soleil, lune, étoiles, luminescence du ciel nocturne).

Le tableau X fournit quelques valeurs de la densité de l'atmosphère bien transparente, pour un trajet au niveau du sol, dans le visible et l'ultraviolet.

TABLEAU X

Densités optiques de l'atmosphère au voisinage du sol, par kilomètre d'air traversé. (La densité optique est le cologarithme dans la base 10 du facteur de transmission).

Long. d'onde en μ	0.55	0.405	0.366	0.302	0.248	0.210	0.193	0.1855
Densité	0.035	0.045	0.070	0.110	0.640	4.10	17	445

La figure 2 fournit les valeurs de transparence atmosphérique (atmosphère pure) dans l'infrarouge.

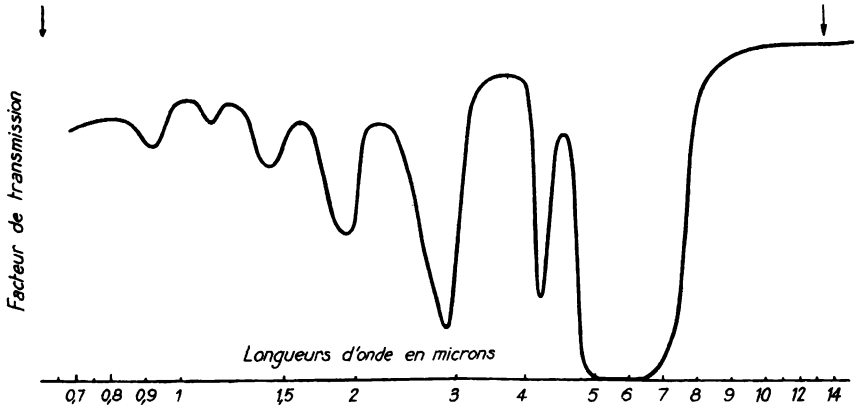


Fig. 2. - Transparences de l'atmosphère dans l'infrarouge.
Courbe spectrale d'absorption d'une atmosphère peu brumeuse (limite de visibilité 20 km.) montrant des bandes d'absorption de la vapeur d'eau et du CO et les régions les plus favorables à la transmission du rayonnement infrarouge. Trajet des rayons dans l'atmosphère : 900 mètres.

Cette courbe indique les fenêtres de transmission utilisables. Dans l'intervalle 5 - 8μ, la transmission est pratiquement nulle, même pour des courtes distances.

Nous ferons remarquer également que l'absorption par la vapeur d'eau ne suit pas la loi exponentielle, elle croît beaucoup moins rapidement avec la distance, suivant des progressions qui dépendent à la fois de la bande observée et de l'intervalle spectral utilisé, cela par suite de la structure fine des bandes de la vapeur d'eau.

LIQUIDES ET COLLES UTILISÉS EN OPTIQUE

Systèmes optiques. - On utilise des lentilles d'eau associées au quartz pour former des systèmes achromatiques transparents à l'ultraviolet. Le sulfure de carbone et mieux le cinnamate d'éthyle sont utilisés pour former des prismes beaucoup plus dispersifs que les prismes de verre.

Liquides d'immersion. - L'immersion d'un corps transparent dans un liquide de même indice supprime la réfraction par les surfaces; elle est utilisée, soit pour l'étude des verres ou cristaux à l'état brut, soit dans des méthodes permettant de mesurer les indices de réfraction sans taille spéciale. Par un mélange en proportions convenables de deux liquides miscibles d'indices très différents, on obtient toutes les valeurs comprises entre l'indice le plus fort et l'indice le plus faible. On utilise le mélange d'huile de paraffine et monobromonaphtalène pour les indices inférieurs à 1,65; le mélange d'eau avec une solution saturée d'iodure mercurique et d'iodure de potassium pour les indices inférieurs à 1,80 une solution d'iodure mercurique dans l'aniline (jaunit rapidement) ou la quinoléine, pour les indices ne dépassant pas 2.

Le coefficient de température de l'indice des liquides est beaucoup plus élevé que celui des solides; il en résulte, d'une part, que la position des images des raies spectrales varie d'une manière prohibitive avec la température (nécessité d'un thermostat si on veut faire des mesures ou des poses longues) et, d'autre part, que le liquide doit être constamment agité pour obtenir l'homogénéité voulue. Si, de plus le liquide est volatil et contenu dans un récipient non étanche, l'agitation devra être énergique et ininterrompue pour prévenir les défauts d'homogénéité dus à la baisse de température de la surface du liquide, et, éventuellement, à son changement de composition s'il s'agit d'un mélange.

Nous donnons ci-dessous le tableau des caractéristiques des liquides cités, auxquels nous avons ajouté :

- le chlorobenzène dont l'indice est très voisin de celui des verres courants :

- l'iodure de méthylène, d'indice élevé, utilisé comme liquide intercalaire dans les mesures d'indices de solides par incidence rasante.

TABLEAU XI
(voir graphique figure I)

Corps	n	ν	$\frac{\Delta n}{\Delta \theta} \times 10^4$	Remarques
Eau	1,333	56	0,9	Vapeurs toxiques
	1,460	49	5,0	Vapeurs toxiques
	1,501	30	6,5	Vapeurs toxiques
Chlorobenzène	1,526	30.6		
Cinnamate d'éthyle ..	1,559	20		
Aniline	1,586	24	5,4	Toxique
Quinoléine	1,624	20	4,8	Toxique
Sulfure de carbone...	1,629	18	7,9	Vapeurs toxiques s'enflammant à 170°
Monobromo-naphtalène	1,658	20	4,6	
Diiodométhane ...	1,737	19.5		
Solution KI-HgI_2(1) ..	1,82			
Quinoléine (1) HgI_2...	2,02			
Huile de cèdre	1,515			

(1) Jaune, absorbe l'extrémité violette du spectre. Très toxique; préserver les appareils des projections de liquide.

Remarque importante.- Les liquides volatils du tableau ci-dessus doivent être enfermés en récipient clos ou leurs vapeurs aspirées lorsque le travail doit être de longue durée, sous peine d'intoxication grave, particulièrement dangereuse dans le cas du tétrachlorure de carbone.

Jusqu'à ces dernières années, on utilisait pour l'assemblage des pièces optiques le Baume de Canada, la gomme Dammar et l'huile de ricin dans le spectre visible et la glycérine pour l'ultraviolet. De nouvelles substances, en général des résines synthétiques, dont certaines possèdent une bonne transparence dans l'ultraviolet, sont vendues dans le commerce; mais on ne possède pas de renseignements sur leur composition.

MATÉRIAUX POLARISANTS

Nous donnerons ici quelques brèves indications sur les matériaux utilisés pour la polarisation de la lumière.

1° Cristaux biréfringents.

On trouvera à ce sujet tous les renseignements utiles dans les traités de physique générale avec la description des divers types de prismes polariseurs (prismes de Nicol, de Foucault, de Glazebrook, de Glane).

La seule matière utilisée est le calcite, ou spath d'Islande, dont la biréfringence est très élevée. Elle fait défaut à l'époque actuelle, ce qui pose un problème grave pour la construction des appareils destinés aux mesures de haute précision.

Des résultats satisfaisants ont été obtenus par M.A. de Gramont et Mlle de Longchamp, en remplaçant le spath par des cristaux de nitrate de sodium artificiel. Malgré les difficultés dues à la protection des surfaces de cette substance très hygroscopique, on peut penser que son emploi ne tardera pas à se généraliser.

Il convient de rappeler que le quartz, matériau très courant, est employé pour la construction des prismes biréfringents de Wallaston et de Rochon. Moins commodes que les prismes de spath, ils permettent néanmoins d'obtenir la séparation d'un faisceau incident de faible étendue angulaire en deux faisceaux distincts polarisés à angle droit, et sont utilisables lorsque le champ polarisé ne dépasse pas 1 à 2 degrés.

2° Cristaux ou autres substances biréfringentes dichroïques.

Les cristaux biréfringents dichroiques possèdent une absorption très inégale pour les deux rayons polarisés à angle droit qu'ils transmettent. Une lame plan parallèle de tourmaline, taillée de manière que l'axe optique soit parallèle aux surfaces ne laisse passer, sous une faible épaisseur, que le rayon extraordinaire, lui-même fortement absorbé.

Les polaroïdes, vendus sous la forme de feuilles minces et souples, sont des polariseurs artificiels utilisant le même processus. Ils sont constitués par une feuille d'une substance orga-

nique transparente (analogue à la cellophane) et biréfringente, teintée au moyen d'un colorant dichroïque qui laisse passer sans absorption notable une seule des composantes du rayonnement. Les mesures ont montré que, dans le vert du spectre, deux polaroides croisés ne laissent passer que le 1/20.000° de la lumière transmise entre lames parallèles. Les résultats sont déjà nettement moins bons aux extrémités du spectre visible, particulièrement du côté violet.

La faible épaisseur des polaroides, la possibilité de les obtenir en très grandes surfaces (par exemple 30 cm. de diamètre) font qu'ils tendent à supplanter les autres dispositifs à l'intérieur du domaine des radiations visibles.

Signalons également qu'on vend en Amérique des feuilles transparentes de matière organique biréfringente, demi-ondes et quart d'ondes.

La cellophane est biréfringente, et peut servir à remplacer les lames cristallines pour diverses applications.

3° Réflexion par les substances vitreuses.

La polarisation par réflexion ne jouit pas de la faveur des usagers, qui lui reprochent de donner lieu à des appareils peu lumineux et à des dispositions incommodes du fait que le rayon émergent n'est pas dans le prolongement du rayon incident. En fait, MM.A. Cotton et P. Manigault ont montré, en réalisant sur ce principe un grand nombre d'appareils dont les qualités sont en tous points comparables à celles des instruments classiques (étude de la polarisation, loupes polarisantes, microscopes de grande puissance mono et binoculaires) que ces inconvénients peuvent être éliminés par une disposition judicieuse des montages.

On retiendra donc que de simples lames plan-parallèles de verre, de qualité à peu près quelconque, pourvu qu'elles ne soient pas biréfringentes, permettent, pour une dépense quasi nulle, d'effectuer tous les montages polarisants. Ceci n'est pas sans intérêt à l'époque présente, où les matériaux polarisants sont extrêmement couteux et ne peuvent être obtenus qu'après de longs délais.

NOTIONS SUR LES DÉFAUTS DE LA MATIÈRE

a. - DÉFAUTS PERMANENTS

Les verres peuvent présenter dans leur masse des opacités ou des variations d'indice, ayant pour effet de perturber la marche des rayons par rapport à celle que leur assigne le calcul. Ces défauts peuvent se classer en deux catégories :

Défauts locaux.- Ce sont les pierres, petits cristaux inclus dans la masse, les bulles de gaz, qui sont inévitables dans certains types de verre, en particulier les verres à la baryte et certains nouveaux verres, et qu'on devra tolérer si elles ne sont ni trop grosses, ni trop nombreuses, enfin des fils ou des feuillets,

lignes ou surfaces très minces, ayant un indice différent du reste de la masse. Ces défauts, s'ils ne sont pas trop nombreux, sont sans inconvénient dans les pupilles d'un instrument; ils apparaissent d'autant plus que les lentilles sont plus proches de l'image, en formant dans l'image des ombres ou des points (bulles et pierres) ou des trainées floues (fils et feuillets).

Défauts étendus.- Ce sont des variations progressives des propriétés du verre, en particulier de l'indice et de la dilatation, étendues à la totalité de la masse. Elles proviennent le plus souvent d'une conduite défectueuse du traitement thermique ou recuisson, que l'on fait subir au verre après la fonte, pour l'amener à un état homogène et stable. Ces variations peuvent être considérables et atteindre quelques unités de la 3° décimale pour l'indice, et 1 à 2×10^{-6} pour la dilatation. De plus, à la température ordinaire, le verre mal récuit évolue constamment vers son état stable (il se recuit), avec variation de l'indice de réfraction et de la forme des surfaces. Pour tous les travaux d'optique de précision, et même s'il s'agit de pièces travaillant uniquement par réflexion, l'homogénéité et la stabilité de l'indice, la stabilité de la forme des surfaces ne peuvent être assurées que par un recuit très poussé, dit recuit fin. Les pièces livrées par le verrier sans spécification spéciale ont subi un recuit de plus courte durée, dit recuit ordinaire qui ne suffit pas en général, surtout dans le cas de pièces volumineuses, à assurer l'homogénéité voulue pour des travaux de précision.

Ces défauts introduisent dans l'image des aberrations, le plus souvent irrégulières, et plus rarement de l'astigmatisme ou de l'aberration sphérique; on peut les faire disparaitre par une nouvelle recuisson convenablement conduite, ou, s'ils sont assez réguliers, par des retouches locales effectuées sur les surfaces. Mais cette pratique n'est pas à conseiller, car l'évolution du verre avec le temps fera apparaître, plus ou moins rapidement, de nouveaux défauts.

Le verre peut également possèder des tensions internes, qui se manifestent par l'apparition de biréfringence. La biréfringence, sauf si elle est très forte (de l'ordre de $\lambda/2$) n'apporte pas de perturbation sensible à la qualité des images. Mais les tensions rendent la taille de précision des surfaces très difficile, sinon impossible.

Il est à remarquer que le contrôle d'un verre par la biréfringence, très répandu, ne donne dans la plupart des cas aucune indication sur l'homogénéité des indices, mais seulement sur les tensions internes; il ne suffit pas, à lui seul, à donner une indication sur la qualité du verre.

Défauts d'homogénéité et macles des cristaux.

Nous nous bornerons à des indications très sommaires sur cette question complexe.

Les cristaux présentent des défauts locaux plus ou moins étendus, sous forme de bulles (inclusions gazeuses) ou d'inclu-

sions solides, ces inclusions pouvant être groupées en nappes ou en volumes, et portant alors le nom de neiges.

Ils peuvent présenter également, le plus souvent au voisinage de l'implantation dans la roche, des défauts d'homogénéité à allure striée ou granulaire, qui les rendent inutilisables.

Les mâcles proviennent de changements locaux dans l'orientation de l'axe du cristal. Les plus connues dans le quartz sont les mâcles du Brésil, vulgairement "aiguilles" et sont visibles en lumière polarisée dans les directions voisines de l'axe, sous forme de triangles dont la base est implantée sur les faces. Les parties mâclées d'un cristal ne doivent pas être utilisées pour la fabrication de pièces optiques.

Certains cristaux présentent des régions diffusantes, dues à la présence de particules ultramicroscopiques, et doivent être éliminés.

Le défaut commun à de nombreux cristaux et qui se manifeste pour certains angles d'observation, par l'apparition de lignes claires, droites et parallèles, qu'on désigne sous le nom de pluie, n'est pas gênant.

On notera, enfin, que la moindre trace de coloration jaune est l'indice d'un manque de transparence dans l'ultraviolet. Il faut prendre garde à ce que certains échantillons de fluorine ou de fluorure de lithium artificiel, ne présentant aucune coloration appréciable, peuvent ne pas laisser passer les radiations au-dessous de 3.000 et même de 3.500 Å.

b. - DÉFAUTS PASSAGERS

Ce sont tous les défauts provenant des variations d'indice de la matière, air ambiant compris, et de la déformation des surfaces sous l'influence des inégalités de température. Ils dépendent à la fois du coefficient de température de l'indice, du coefficient de dilatation des milieux traversés, et de la longueur du trajet optique.

Voici quelques chiffres pour fixer les idées :

Pour un trajet de 10 cm. dans un verre courant ($\frac{\Delta n}{\Delta \theta} = 2 \times 10^{-6}$), coefficient de dilatation $\alpha = 9 \times 10^{-6}$) une différence de température de 1° produit une variation de trajet optique de $1,2\lambda$, avec $\lambda = 0,6\mu$

Pour un trajet de 1 mètre dans l'air et la même différence de température de 1°, la variation correspondante sera de $1,7\lambda$. Pour un miroir de 3 cm. d'épaisseur et la même différence de température, on trouverait $1,0\lambda$. Or, la limite permise est de $\lambda/4$ (règle de Rayleigh).

Dans le cas où l'on forme un spectre au moyen d'un prisme à liquide, la constance et l'homogénéité de la température doivent être assurées à 0,01 degré près, si l'on veut que la qualité de l'image se conserve et que la position des raies spectrales reste fixe à la largeur théorique de l'image près.

A cela, on doit ajouter les dilatations du support des pièces optiques, qui les déplacent par rapport à leur position exacte.

Dans les montages de laboratoire comportant de grands intervalles d'air, les défauts passagers sont dus, en presque totalité, à l'air ambiant. C'est le même défaut (Waving) que l'on constate dans l'observation des objets éloignés à la lunette par une journée ensoleillée.

Il en résulte qu'un système optique ne donnera sa limite de résolution théorique que s'il est en équilibre de température, cet équilibre devant être d'autant mieux réalisé que les trajets optiques sont plus longs, et que son ouverture est plus grande. Un appareil susceptible d'être soumis à de brusques variations de température ou à des échauffements locaux devra être calorifugé avec assez de soin pour que l'équilibre thermique interne reste constamment réalisé (enveloppe interne conduisant bien la chaleur, entourée d'une gaine calorifuge). L'usage d'un thermostat n'est à recommander que s'il est bien établi, sinon, le remède peut être pire que le mal.

Ces précautions devront être tout spécialement observées, lorsqu'intervient une pièce comportant un liquide, ou dans l'interférométrie à longs trajets optiques.

LES SURFACES OPTIQUES

La presque totalité des surfaces utilisées en optique sont planes ou sphériques. Dans certains cas peu nombreux, on construit des surfaces non sphériques (paraboloïdes de révolution ou surfaces de révolution dont la méridienne a été obtenue par le calcul) différant peu de la sphère, en procédant par retouches locales. Enfin, on étudie de divers côtés des machines susceptibles de tailler des surfaces du second degré de caractéristiques quelconques : les résultats obtenus sont encore trop imparfaits pour les applications à l'optique de précision, mais permettent dès maintenant de réaliser des condensateurs de lumière à très grande ouverture et des oculaires à grand champ.

La qualité de la forme d'une surface est contrôlée, en général, au moyen d'un calibre interférentiel pratiquement parfait, en lumière blanche; elle s'exprime, en langage d'atelier d'optique, par le nombre de franges en lumière blanche dont la surface à contrôler s'écarte de celle du calibre. Si l'on observe une teinte uniforme entre les deux surfaces, elles sont dites "à la teinte plate", c'est le meilleur résultat que l'on puisse obtenir dans la pratique courante, les écarts ne dépassant pas /8 à /10. On dira de même qu'une surface est exacte à 0,5, 1,10 franges, etc, (voir p. 211) les spécifications de qualité des surfaces dans les cas courants). Nous renvoyons le lecteur, pour ce qui concerne la mesure des rayons de courbure ou le contrôle des défauts de forme des surfaces, par les méthodes interférentielles ou autres, aux traités d'optique. Signalons également qu'il existe en France, des laboratoires spécialisés pour ces opérations de contrôle.

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE PAR LES SURFACES

Le facteur de réflexion d'une surface polie limitant deux surfaces d'indices de réfraction n_1 et n_2 est donné par la formule de Fresnel :

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2$$

valable pour une lumière incidente non polarisée et des angles d'incidence ne dépassant pas 40°, pour la plupart des cas de la pratique.

En ce qui concerne les verres, le facteur de réflexion ci-dessus n'est valable que pour des surfaces fraîchement polies. Il diminue sensiblement avec le temps (diminution pouvant atteindre 40%), par altération de la surface sous l'action combinée de l'humidité et du gaz carbonique de l'air.

Diminution ou augmentation de la réflexion par les surfaces.

La lumière réfléchie par les surfaces est une des principales causes d'altération de la qualité des images fournies par les instruments. D'autre part, la lumière réfléchie, perdue pour l'image, provoque la plus grande partie de l'absorption, d'autre part, la lumière réfléchie un nombre pair de fois entre les diverses surfaces vient de superposer à l'image, qu'elle recouvre d'un voile de lumière parasite. On augmente la transparence d'un instrument et on diminue sa lumière parasite en réduisant, au moyen de traitements appropriés, la réflexion par les surfaces.

Le tableau XII donne les valeurs calculées du facteur de transmission et de la lumière parasite, d'une pile de lame à faces parallèles, pour différentes valeurs du facteur de réflexion.

TABLEAU XII

Nombre de surfaces		2	4	10	20	30	100
Facteur de transmission	R = 0,05	0,90	0,81	0,60	0,36	0,21	0,006
	R = 0,025	0,95	0,905	0,78	0,60	0,47	0,08
	R = 0,01	0,98	0,96	0,905	0,82	0,74	0,37
Lumière parasite: Pourcentage dans l'image	R = 0,05	0,002	0,012	0,100	0,36	0,86	27
	R = 0,025	0,001	0,002	0,005	0,08	0,19	2,5
	R = 0,01	0,001	0,001	0,003	0,016	0,036	0,36

Le traitement des surfaces pour diminuer leur réflexion, ou plus brièvement, le traitement antiréfléchissant, consiste à déposer sur ces surfaces une couche uniforme d'une substance transparente d'indice faible, et d'épaisseur optique $\lambda/4$, λ étant la longueur d'onde correspondant au maximum de sensibilité du récepteur utilisé, par exemple $\lambda = 0,55\,\mu$ pour l'oeil. Les substances utilisées le plus souvent dans ce but sont la

cryolite (qui ne doit pas être utilisée à l'extérieur) et le fluorure de magnésium; on les dépose par évaporation sous vide.

On améliore l'efficacité des traitements, surtout s'ils doivent être déposés sur des surfaces de faible indice, en utilisant des couches doubles, l'une, d'indice élevé, étant au contact de la surface, l'autre, d'indice faible, n_t à l'extérieur. On réglera l'épaisseur de la couche d'indice fort de manière que le facteur de réflexion de la surface soit augmenté jusqu'à la valeur :

$$R = \left(\frac{n_t^2 - 1}{n_t^2 + 1}\right)^2 .$$

On déposera ensuite la couche de faible indice, jusqu'à ce que le minimum de réflexion soit atteint.

La courbe de la figure 3 indique la variation avec la longueur d'onde du facteur de réflexion, pour un traitement dont l'efficacité est maximum dans le vert du spectre. On voit que le phénomène est très sélectif, d'où résultent les remarques suivantes :

a) le traitement n'est efficace que dans un intervalle spectral réduit :

b) On obtiendra le maximum de transparence d'un instrument, pour l'ensemble d'un domaine spectral donné, en faisant coïncider la longueur d'onde correspondant à l'efficacité maximum du traitement avec la longueur d'onde du maximum de sensibilité du récepteur pour la source utilisée.

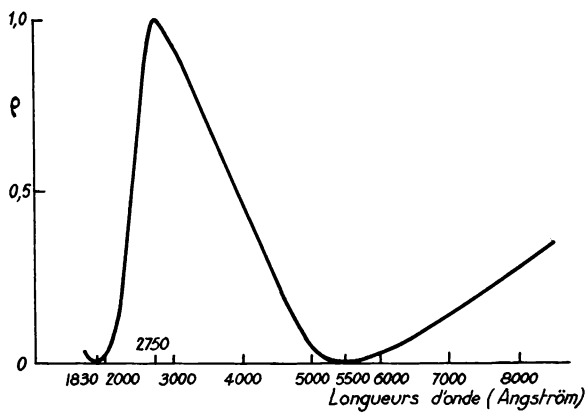


Fig. 3. - Facteur de réflexion d'une surface traitée pour un minimum dans le vert.

Il importe donc de bien spécifier, lorsqu'on fait exécuter un traitement de surfaces, d'une part la nature de la source (par exemple par sa température de couleur), et d'autre part la nature du récepteur (par la longueur d'onde du maximum de sensibilité).

Dans certains cas particuliers, on peut être amené à procéder différemment, par exemple pour compenser, par une augmentation de transparence, un défaut de sensibilité du récepteur dans une zone spectrale donnée.

Les couches augmentant la réflexion peuvent être opaques (miroirs) ou semi-transparentes.

Les couches opaques sont constituées par des dépôts de divers métaux possédant un facteur de réflexion élevé et une résistance suffisante aux agents atmosphériques. Les principaux métaux utilisés en optique sont :

L'Argent, possède un facteur de réflexion très élevé dans le spectre visible (0,96) et l'infrarouge (0,98 à 0,99), mais très mauvais dans l'ultraviolet. Il se conserve mal au laboratoire (il se sulfure) mais assez bien dans un endroit isolé de toute agglomération. On peut le déposer par voie chimique, par pulvérisation cathodique ou par évaporation dans le vide; dans ce dernier cas, on obtient une protection très efficace contre les altérations en le recouvrant par le même procédé d'une mince couche de silice.

On peut retarder notablement la sulfuration des couches d'argent en les immergeant pendant quelques minutes dans une solution d'acide chromique à une température de 31°C (concentration de la solution à peu près indifférente).

L'aluminium, facteur de réflexion 0,92 dans le spectre visible, ne baissant pas sensiblement dans l'ultraviolet. Dans l'infrarouge, il réfléchit mal les longueurs d'onde supérieures à 8μ, qui sont absorbées par la couche d'alumine dues à l'oxydation de la surface à l'air. Les couches d'aluminium sont déposées exclusivement par évaporation sous vide; elles ont une bonne résistance mécanique et une bonne adhérence. Les miroirs d'aluminium nu s'altèrent assez rapidement à la campagne (air humide) et surtout au bord de la mer. On ralentit beaucoup cette altération en déposant des couches épaisses (de l'ordre de 0,5μ) et en provoquant la formation d'une couche protectrice d'alumine, obtenue en plongeant la surface pendant un quart d'heure dans une solution aqueuse à 20% en poids de bichromate de potassium . Dans le cas de couches épaisses, il faut s'assurer de la constance de l'épaisseur, sinon, on risque d'altérer la qualité optique de la surface.

Le rhodium a un facteur de réflexion moyen de 0,71 dans le spectre visible, baissant rapidement dans le violet et l'ultraviolet, bon dans l'infrarouge; il est pratiquement inaltérable. On le dépose par évaporation, mais il faut un excellent vide. Les couches sont très adhérentes et résistantes.

Le chrome a un mauvais pouvoir réflecteur : on l'utilise à cause de son adhérence et de sa dureté exceptionnelles; le plus souvent, il sert de sous-couche au contact du verre pour augmenter l'adhérence de divers dépôts métalliques.

Le platine extrêmement adhérent, et le palladium sont déposés par pulvérisation cathodique ou évaporation sous vide.

L'or enfin, remplace avantageusement l'argent dans l'infrarouge, avec un facteur de réflexion presque identique, et une inaltérabilité pratiquement totale.

On peut obtenir d'excellents miroirs sur verre en déposant électrolytiquement un métal sur le verre préalablement recou-

vert d'une couche d'argent bien adhérente, facile à obtenir par voie chimique. Ce procédé ne s'applique pas aux dépôts d'aluminium.

Tous ces métaux sont utilisés pour former des couches semi-transparentes. Le palladium et le platine sont à recommander pour la fabrication d'écrans absorbants d'une neutralité remarquable dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge.

Il faut prendre garde que les couches semi-transparentes d'aluminium et de chrome s'éclaircissent progressivement à l'air, par suite de la formation d'une couche superficielle d'épaisseur croissante d'oxyde transparent.

La figure 4 fournit quelques valeurs du facteur de réflexion de ces métaux (auxquels on a ajouté l'or et le nickel) en fonction de la longueur d'onde.

Le tableau XIII fournit les valeurs du facteur de réflexion et de transmission des couches semi-transparentes.

TABLEAU XIII. - FACTEURS DE RÉFLEXION R ET DE TRANSMISSION T DE COUCHES SEMI-TRANSPARENTES D'ARGENT ET D'ALUMINIUM

R	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,85	0,90
T Aluminium	0,78	0,55	0,42	0,32	0,27	0,20	0,13	0,07	0,04	
T Argent	0,85	0,85	0,68	0,55	0,43	0,33	0,25	0,17	0,10	0,04

On remarquera que les couches semi-transparentes possèdent une forte absorption, croissant avec l'épaisseur. On peut obtenir des couches peu ou pas absorbantes, mais dont le facteur de réflexion ne dépasse pas 47%, en déposant sur le verre une couche d'épaisseur $\lambda/4$ d'un corps transparent d'indice de réfraction très élevé.

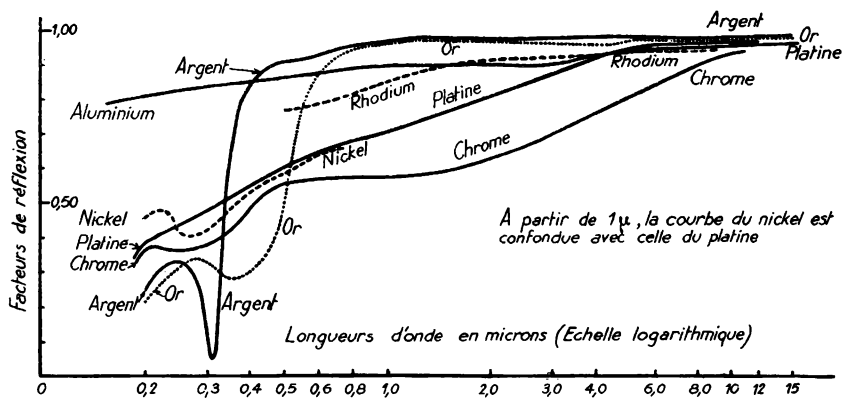


Fig. 4. - Facteurs de réflexion.

Voici quelques indications relatives à des couches d'épaisseur $\lambda/4$.

TABLEAU XIV. - Facteurs de réflexion R et d'absorption A de surfaces revêtues de couches minces de fort indice et d'épaisseur optique $\lambda/4$

Substance déposée	Oxyde de chrome	Oxyde de Titane	Sulfure de zinc	Sulfure d'antimoine
R	0,23	0,32	0,35	0,47
A	0	0	0,01	0,06

Les substances sont déposées par évaporations dans le vide : le chrome est déposé à l'état métallique, puis oxydé par chauffage à l'air à 351°. L'oxyde de titane se décomposant partiellement lors de la vaporisation, on fera subir à la couche une oxydation à l'air dans les mêmes conditions que pour le chrome; sinon l'absorption ne sera pas nulle.

L'emploi de couches multiples permet d'obtenir de meilleurs résultats. En voici les principales applications.

a) Augmentation de la réflexion de couches métalliques, opaques, ou semi-transparentes, par dépôt de couches successives de corps transparents, ayant alternativement un indice faible et un indice fort. On peut ainsi obtenir des miroirs d'argent ou d'aluminium améliorés, dont le facteur de réflexion atteint 0,99 et 0,98. De même, la réflexion d'une couche métallique semi-transparente peut être améliorée sans augmenter son absorption. Par exemple, une couche d'argent améliorée (Jacquinot et Dufour), donnera un facteur de réflexion de 0,94 pour un facteur de transmission de 0,04; cela est un gain important par rapport aux chiffres du tableau XIII.

b) Des surfaces semi-transparentes de réflexion élevée (par exemple R = 0,95), mais sélective, peuvent être obtenues par empilement de couches transparentes, d'indices alternativement faibles et forts, avec une absorption plus faible que lorsqu'on utilise du métal.

Les couches a et b sont maintenant couramment utilisés pour les interféromètres Fabry-Pérot dont elles ont amélioré considérablement les possibilités.

c) Un étalon Fabry-Pérot de faible épaisseur, constitué par une couche d'indice faible comprise entre deux couches semi-transparentes métalliques, à réflexion améliorée ou non, constitue un filtre dont la bande passante peut être placée à volonté dans le spectre sa largeur pouvant varier de 200 Å à quelques Å.

DÉFAUTS DE POLISSAGE ET ALTÉRATION DES SURFACES

On constate, en dehors de toute considération de forme, deux sortes de défauts :

Le "gris" (ou surfaces "grises") provient d'un polissage

insuffisant ayant laissé subsister des piqûres d'abrasif; c'est un défaut très grave, par la lumière parasite qu'il introduit dans l'appareil; il doit être évité dans tous les instruments photométriques et spectrophotométriques, et dans les instruments destinés à fournir des images détaillées, en particulier d'objets à faibles contrastes. Le gris s'observe aisément en éclairant violemment la surface et en l'observant par réflexion sur un fond noir.

La "chair de poule", appelée aussi peau de crapaud, correspond à une surface composée de cuvettes minuscules, provenant d'un polissage complet d'une surface travaillée avec un abrasif trop grossier. La chair de poule introduit de la diffusion dans l'image et doit être évitée comme le gris, spécialement pour les surfaces destinées aux interférences. On met la chair de poule en évidence en observant la surface à la loupe, par réflexion. On prend comme source une limite d'ombre et de lumière, par exemple un barreau de fenêtre se détachant sur le ciel.

Les rayures de toutes sortes ont les mêmes inconvénients que le gris. On devra donc éviter avec le grand soin de les provoquer en manipulant les surfaces.

Altération des surfaces.- Les verres d'optique s'altèrent à la longue sous l'action combinée de l'acide carbonique de l'air et de l'humidité. Il se forme un précipité de silice gélatineuse avec libération de sels solubles, formant un voile diffusant, facilement éliminé par essuyage, ou mieux, lavage à l'eau et essuyage. Le film de silice qui subsiste présente les colorations des lames minces, que l'on attribue improprement à une oxydation des surfaces; s'il ne diffuse pas, il ne présente aucun inconvénient, et il a même pour effet d'augmenter légèrement la transparence. Lorsque l'attaque est plus importante, elle peut introduire de la diffusion et même un dépolissage partiel qui rend la surface impropre à tout usage. Cet effet est particulièrement gênant dans les pays chauds et humides.

Le dépôt de silice et le voile consécutif peuvent également se produire par souillure de la surface par les acides provenant de le peau; les verres facilement attaquables ne doivent jamais être touchés avec les doigts.

L'attaque se produit si le verre est mis au contact d'un corps acide, si faible soit-il, comme par exemple, l'eau distillée. On évitera toute altération en ne mettant au contact du verre que des liquides neutres ou, pour plus de sécurité, rendus légèrement alcalins, et en évitant tout contact avec les doigts (manipulations avec gants de caoutchouc ou pinces flambées). Nous ferons remarquer que ces précautions qui peuvent sembler exagérées, sont appliquées à l'échelle industrielle par des établissements soucieux de préserver au maximum leurs surfaces contre toute altération.

Le voile se produit toujours sur les surfaces internes d'un instrument, simplement parce qu'elles ne sont jamais essuyées.

L'altérabilité des surfaces est très variable suivant les types de verre, et même dans les différents verres d'un même

type. Le procédé le plus efficace pour apprécier l'altérabilité d'un verre, consiste à noter le temps qu'il faut pour obtenir une couche de silice d'épaisseur $\lambda/4$, qui présente la teinte pourpre, par immersion dans une solution d'acide nitrique pur à 1/1.000 (la concentration agit fort peu sur la durée d'attaque). A la température ordinaire, le temps peut varier, suivant les verres, de plusieurs milliers d'heures à 30 secondes. On admettra que les verres dont la couche demande plus de deux heures à se former à une température de 95°, ont une excellente résistance; par contre, ceux dont la couche se forme en moins d'une heure à la température ordinaire sont très altérables, et doivent faire l'objet de grandes précautions de montage et de manipulation.

En ne perdant pas de vue que de grandes différences existent entre verres de la même famille, on peut dire que les crowns ordinaires, les crowns au zinc, les borosilicates-crowns et les flints ordinaires d'indice inférieur à 1,63 résistent bien aux altérations. Par contre, les flints barytes, les flints extra-denses et surtout les baryum-crowns et les phosphate-crowns sont extrêmement délicats.

Précautions à prendre dans le cas de surfaces tendres ou hygroscopiques

Les surfaces de verre, en général, et plus spécialement des verres très altérables se raient d'autant plus facilement qu'elles sont mieux dégraissées. On prendra les plus grandes précautions pour que les étoffes ou peaux de chamois, servant au nettoyage ou à l'essuyage, ne contiennent aucune particule dure. On enlèvera la poussière, soit au moyen d'un blaireau doux, soit par soufflage.

Les précautions devront être encore plus grandes dans le cas de surfaces très tendres (spath, fluorure de lithium et de sodium, fluorine, sel gemme, nitrate de sodium). Toutes les fois que cela sera possible, ces surfaces seront protégées par dépôt d'une couche mince dure (par exemple silice) ou par collage d'une lame de verre, ou en emprisonnant la pièce entre deux lentilles de verre.

Les surfaces des corps hygroscopiques (en particulier NaCl, K Cl, NO_3Na) se dépolissent à la première condensation de buée. On évitera cet inconvénient par les précautions suivantes :

1° Rendre les instruments aussi étanches que possible, et les munir d'un dessséchant renouvelé fréquemment.

2° Ne jamais ouvrir de tels instruments sans s'assurer que leur température est un peu supérieure à la température ambiante Il pourra être utile de les munir d'un chauffage interne très doux, par exemple une lampe à incandescence, que l'on fera fonctionner quelques heures avant d'ouvrir l'appareil; mais il est alors indispensable que l'air intérieur soit bien sec.

NETTOYAGE DES SURFACES OPTIQUES

1° Obtenir une surface optiquement vide.- Pour débarasser une surface, supposée parfaitement polie, de toute trace de par-

ticules diffusantes ou de poussière, on la lave avec un chiffon propre imbibé d'alcool; après séchage complet, on l'essuie avec un morceau de papier Joseph de bonne qualité (sans peluches). La présence d'un peu de graisse provenant des doigts n'a pas d'importance (si le verre est peu altérable) et facilite même l'opération. On enlève les quelques poussières qui pourraient subsister en soufflant (en une ou deux fois seulement) au moyen d'une poire en caoutchouc.

2° Obtenir une surface chimiquement propre. - Il faut qu'en tous ses points, la matière soit au contact de l'air. Deux sortes de causes s'y opposent :

a) Le film de silice dû à l'altération, qui peut être extrêmement nuisible dans certains cas, par exemple, pour le dépôt de couches antiréfléchissantes (il occasionne des couches irrégulières). La seule manière de l'enlever est de repolir la surface, ou d'utiliser cette surface immédiatement après polissage, en la protégeant de tout contact acide;

b) Les souillures diverses déposées à la surface (graisses, poussières, traces de poix du polissage, etc...).

Le procédé classique de nettoyage qui comporte l'usage successif de la benzine ou de l'essence, d'un détersif, de la potasse ou de l'acide nitrique, ne convient que pour les verres très résistants. Une surface de baryum-crown peut être détruite en quelques instants par immersion dans l'acide nitrique.

Lorsqu'on n'est pas certain de l'inaltérabilité d'un verre, on utilisera une bouillie épaisse de carbonate de calcium précipité pur dans de l'eau distillée rendue légèrement alcaline, on frotte avec un coton propre, puis rince soigneusement pour enlever toute trace de grains de carbonate. Sécher si possible par centrifugation, sinon sécher à l'alcool bien exempt de graisse et d'eau.

Dans le cas où le nettoyage est effectué en vue d'un dépôt par évaporation dans le vide, et lorsque l'installation comporte le nettoyage par la décharge électrique, il suffit de nettoyer à l'alcool bien dégraissé, de manière que l'aspect de la surface soit bien propre. Même s'il reste une couche de graisse très mince, elle sera détruite par la décharge.

Dans tous les cas, les manipulations doivent être effectuées avec des gants de caoutchouc, bien dégraissés, ou avec des pinces flambées.

LES ÉLÉMENTS DES SYSTÈMES OPTIQUES

Nous fournirons ici quelques indications relatives aux pièces d'optique fabriquées en série, ainsi que des notions sur les tolérances et spécifications à indiquer au constructeur pour la fourniture des systèmes optiques construits isolément en vue d'applications déterminées.

Il y aura intérêt, toutes les fois que ce sera possible, à utiliser des pièces de série, même si cela doit amener de petites

modifications aux appareils dont on a fait le projet; les appareils fabriqués spécialement, en exemplaire unique, ont un prix de revient très élevé parce que les frais de calcul et d'outillage ne peuvent être amortis sur un grand nombre d'exemplaires, et ne présentent pas, en général, les garanties de qualité qui sont le propre du travail en série. En cas d'hésitation, le constructeur, qui connait bien les qualités et les défauts de sa marchandise, sera le meilleur conseiller.

PIÈCES D'OPTIQUE COURANTE DU COMMERCE

1. - Verres de lunetterie.

Les verres de lunetterie sont des lentilles simples, en crown, d'indice de réfraction moyen 1,525; les verres à bords bruts ont un diamètre voisin de 45 mm, avec bords rodés ce diamètre est de l'ordre de 40 mm. Ils comprennent les catégories suivantes :

a) les verres dits sphériques. Ils sont à surfaces sphériques, du type dit "ponctuel" ayant la propriété de corriger l'astigmatisme des pinceaux obliques pour un objet à l'infini, la position du diaphragme étant situé à 25 mm de la surface concave. L'image se forme sur la sphère de Petzwall, de rayon nf, n étant l'indice de réfraction, f la longueur focale.

Les puissances que l'on trouve dans le commerce sont comprises entre + 20 et - 20 dioptries, avec les échelonnements suivants :

0,25 dioptrie entre 0 et 5 dioptries.

0,50 dioptrie entre 0 et 10 dioptries.

1 dioptrie entre 10 et 16 dioptries.

2 dioptrie entre 16 et 20 dioptries.

b) les verres dits toriques, du type "ponctuel", dont l'une des surfaces est sphérique et l'autre torique, avec un écart convenable des rayons de courbure principaux pour obtenir un astigmatisme déterminé. En temps normal, il existe en stock les puissances sphériques avec l'échelonnement indiqué plus haut, combinées avec les puissances cylindriques de - 5 à + 5 dioptries, échelonnées en 0,25 dioptrie. Les écarts de 0,12 dioptries peuvent être obtenues rapidement sur commande.

Remarque : En métallisant une des surfaces des verres sphériques ou toriques, on obtient des miroirs à bon marché avec la possibilité d'une très grande variété de courbures concaves, convexes, ou toriques.

c) Les verres prismatiques, comprenant des verres à faces planes ou courbes, ces derniers étant fabriqués spécialement. Les angles varient de 0 à 10 degrés, avec un échelonnement de degré en degré.

2. - Lames plan - parallèles.

La glace ordinaire, ou mieux la glace dite de "planimétrie", est souvent avantageuse pour constituer des miroirs plans ou des lames à faces parallèles. En faisant un choix dans les chutes de coupe des miroitiers, on trouve fréquemment des régions de quelques centimètres carrés dont la planéité ou le parallèlisme sont excellents.

3. - Autres lentilles sphériques.

Enfin, il existe des lentilles de condensateurs (plan-convexes très puissantes) ou des loupes simples, de qualité médiocre.

OPTIQUE DE PRÉCISION

On ne trouvera pas, en général, dans le commerce, de miroirs sphériques; il existe des lames à faces planes et parallèles d'excellente qualité (miroirs de sextants, diverses glaces de collimateurs, hublots de fermeture d'instrument). Leur tolérance de planéité est de l'ordre d'une frange, celle de parallélisme de 4 à 20 franges, mais on trouvera souvent beaucoup mieux si on a la faculté de choisir dans un lot.

1. - PRISMES DÉVIATEURS

Il existe une très grande variété de prismes à réflexion totale d'excellente qualité, qui sont utilisés en général pour redresser les images ou changer la direction des faisceaux lumineux.

Nous nous bornerons à fournir une liste des prismes les plus courants :

1° Prismes à réflexion totale (fig.5) pouvant être utilisés suivant a ou b. La combinaison de deux prismes tels que b ou de 4 prismes tels que a, forme un système redresseur de Porro.

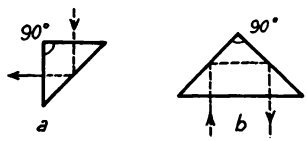


Fig. 5. - Prismes à réflexion totale.

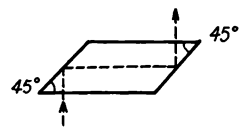


Fig. 6. - Prisme rhomboide.

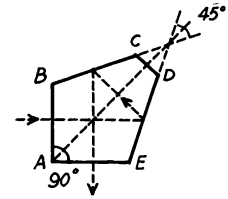


Fig. 7. - Prisme dit équerre "optique".

2° Prismes rhomboïdes, servant à obtenir le décalage latéral d'un faisceau sans changement d'orientation de l'image (fig. 6)

3° Prismes déviateurs à 2 réflexions. Les plus courants sont dits équerres optiques et devient le faisceau de 90° (fig.7). Ils présentent la propriété de laisser l'image immobile lorsque le prisme tourne autour d'une parallèle aux arêtes d'intersection.

4° Prismes de Wollaston : ils ne changent pas la direction du faisceau. Ils ont les mêmes propriétés qu'un miroir plan parallèle à l'axe du faisceau (fig.8).

Dans ces différents prismes, une ou la totalité des surfaces réfléchissantes peuvent être remplacées par une face "en toit", c'est-à-dire par un dièdre à 90° dont le plan bissecteur est situé dans le plan de section principale du prisme qui contient l'axe optique (fig.9). Il est ainsi possible d'augmenter le nombre des réflexions, ce qui permet de résoudre les divers problèmes de redressement d'image qui peuvent se poser. Mais il faut bien prendre garde que, lorsque le faisceau incident rencontre simultanément les deux faces du toit, l'angle à 90° doit être réalisé avec une très grande précision, sinon l'image est dédoublée. Les prismes en toit utilisés dans ces conditions sont très couteûx.

Il existe dans plusieurs maisons d'optique des prismes monobloc formés par diverses combinaisons des prismes élémentaires décrits ci-dessus : on se renseignera auprès des constructeurs.

2. - OBJECTIFS ET LENTILLES DE PRÉCISION

Les systèmes optiques courants que l'on peut trouver tout faits chez les constructeurs sont des objectifs de lunette, des objectifs photographiques ou de projection, des objectifs de microscope, ainsi que divers types d'oculaires.

Ces systèmes sont pratiquement toujours corrigés des aberrations pour les radiations du spectre visible. Ce n'est qu'exceptionnellement qu'on trouvera des systèmes corrigés pour l'ultraviolet ou l'infrarouge.

Objectifs de lunettes.

Ces objectifs ont quelquefois des résidus d'aberration sphérique et chromatique, quand ils sont calculés pour être associés à des systèmes prismatiques. Leur qualité est néanmoins excellente, et ils conviennent aux travaux les plus délicats.

Les longueurs focales les plus courantes sont comprise entre 150 et 500 mm., les ouvertures entre f/8 et f/4. Leur champ de netteté maximum est faible (astigmatisme et courbure) et ne dépasse pas, suivant les types, 4 à 8°. Ils ne sont pas mis en vente pour le public, mais il est possible de les obtenir après entente avec le constructeur.

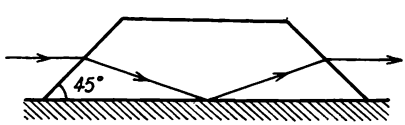


Fig. 8. - Prisme de Wollaston.

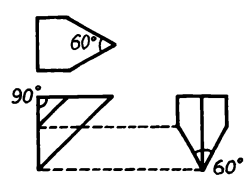


Fig. 9. - Prismes en toit.

Objectifs photographiques et de projection.

Ces objectifs sont intéressants par leur grand champ et les grandes ouvertures qu'il est possible d'obtenir. Mais la qualité de l'image est très inférieure à celle des objectifs de lunette, car il est inutile que la définition de l'image soit meilleure que celle des émulsions photographiques; ils donneront toujours des résultats médiocres si on les emploie comme objectifs de lunette ou de viseurs, à moins de se limiter à de très faibles grossissements, ou de les diaphragmer à une ouverture ne dépassant pas f/10.

Les objectifs photographiques modernes possèdent une correction chromatique qui diffère peu de celle des instruments visuels, ce qui est dû à l'usage presque exclusif des émulsions panchromatiques dont la zone de sensibilité spectrale est analogue à celle de l'oeil. Les objectifs de projection sont corrigés comme les instruments visuels. Les uns comme les autres ne fourniront que des résultats médiocres si on les utilise dans le proche ultraviolet et le proche infrarouge, pour lesquels des systèmes spécialement corrigés sont indispensables. La définition de ces objectifs photographiques ne dépasse pas 0,01 mm. au centre du champ et tombe souvent à 0,05 mm. au bord du champ.

Il n'est possible de fournir ici la liste de tous les types existants, qui est extrêmement longue. Il n'est pas possible non plus d'effectuer un classement par catégories, car la différenciation des types qui existait autrefois entre la projection et la prise de vues a disparu.

On retiendra seulement les indications générales suivantes :

Les objectifs à petit champ, du type Petzwall (champ maximum 10°) et aplanat (champ de 20 à 40° suivant les modèles) possèdent une bonne définition dans la partie centrale du champ. Les Petzwall peuvent recevoir une ouverture atteignant f/2 , alors que celle des aplanats ne pourra guère dépasser f/5.

Les objectifs à champ normal (60°) ou à grand champ, sont des anastigmats dont il existe une très grande variété de types. Leur définition est peu variable dans le champ, bien que décroissant du centre au bord, et nettement inférieure à celle des Petzwall et des aplanats. A champ égal, elle est d'autant meilleure que l'ouverture est plus faible. A ouverture égale, elle est d'autant meilleure que la longueur focale est plus petite.

Sans tenir compte des types existants, on peut classer ces objectifs en deux catégories :

a) Les objectifs de prise de vue ou de projection cinématographique, dont le champ de netteté est déterminé par les dimensions standard des images :

Cercle de 28 mm. de diamètre pour le format de 35 mm.
" " 15 mm. " " " " " " 16 mm.
" " 7,5 " " " " " " 8 mm.

Pour les champs indiqués, il existe toute une série de longueurs focales et d'ouvertures.

b) Les objectifs d'appareils photographiques d'amateurs, de professionnels ou d'aviation. Il faut prendre garde que les objectifs dits "à portraits" possèdent souvent des résidus d'aberration importants, laissés intentionnellement pour adoucir les contours; ces objectifs ne conviennent pas aux applications de laboratoire.

Le tableau suivant fournit une liste de caractéristiques moyennes de ces divers objectifs, les valeurs individuelles variant quelque peu d'un constructeur à l'autre.

TABLEAU XV. - OBJECTIFS DE PRISE DE VUE CINÉMATOGRAPHIQUE.

FORMAT 35 mm.		FORMAT 16 mm.		FORMAT 8 mm.	
Ouverture	Longueur focale mm.	Ouverture	Longueur focale mm.	Ouverture	Longueur focale mm.
F/2-F/2,5-F/3,5 ...	35	F/1,5	25	F/1,5 ...	12,5
F/1,5-F/2-F/3,5 ...	50	F/1,9	16		
F/1,8-F/2,5-F/3,5.	75	F/1,9	20		
F/1,8-F/3-F/3,5 ...	100	F/1,9	35		
F/2,5-F/4,5	145-150	F/1,9	50		
Pour les formats 16 et 8 mm., nous n'avons pas repété la liste des objectifs d'ouvertures plus faibles, établis pour couvrir le format 35 mm.					

Objectifs de projection cinématographique.

Type Petzwall. - Toutes les longueurs focales de 35 à 200 mm. Echelonnement de l'ordre de 5 à 10 mm., avec des ouvertures comprises entre F/2 et F/3.

Type anastigmat à 6 verres.- Toutes les longueurs focales de 60 à 20 mm. : ouverture F/2.

Objectifs pour chambres photographiques.

Objectifs anastigmats, champ voisin de 60°

Ouverture	Longueurs focales
F/2.....	100-150 mm.
F/2,5	100-250 mm.
F/3,5	50-200 mm.
F/4,4 - F/5,7 - F/6,3	100-500 mm.

Objectifs grands angulaires, champ de 90°, pouvant atteindre 100° en les diaphragmant à F/30.

Ouverture maxima : F/6,3 & F/8 : Longueurs focales de 100 à 200 mm.

Objectifs de microscope.

Ce sont des objectifs pouvant atteindre de grandes ouvertures, à définition élevée, mais à champ très restreint, limité par la courbure de l'image. Leur distance frontale (distance de l'objet à la première surface) peut être extrêmement courte pour les modèles puissants.

Les modèles dits "bactériologiques" sont corrigés pour l'observation des objets recouverts d'une "lamelle couvre-objet", lame à faces parallèles standard de 0,17 mm. d'épaisseur et d'indice de réfraction 1,515.

Les modèles dits "métallographiques" sont corrigés pour l'observation directe de l'objet. Cette distinction n'intervient pas pour les objectifs dont l'ouverture numérique est inférieure à 0,25, ni pour les objectifs à immersion à huile de cèdre. Par contre, un objectif bactériologique à sec puissant, utilisé sans lamelle, donnera des images détestables.

On trouvera dans les catalogues trois qualités : objectifs achromatiques, semi-apochromatiques, et apochromatiques, qui correspondent à des corrections de plus en plus poussées. Les achromatiques suffisent pour la plupart des applications; on améliore du reste sensiblement leur qualité en utilisant de la lumière verte ou jaune obtenue en filtrant la lumière blanche. Par contre, si l'on a pour but la mise en évidence de détails aussi fins que possible, par l'observation visuelle ou la photographie, les apochromatiques donnent des résultats nettement supérieurs.

On notera que dans tous les cas, et cette règle est d'autant plus impérative que l'objectif est plus puissant, la bonne qualité des images ne se maintiendra que si la "longueur de tube" est égale à 160 mm. pour les objectifs bactériologiques et à 190mm. pour les objectifs métallographiques.

Certains types d'objectifs métallographiques sont corrigés pour une longueur de tube infinie (objet dans le plan focal). Une lentille auxiliaire permet la formation d'une image reprise par l'oculaire. La longueur du tube peut ainsi varier dans de larges limites sans affecter la qualité des images, à la condition expresse de disposer, dans chaque cas, d'une lentille auxiliaire spécialement corrigée.

Nous donnerons, dans le tableau ci-après, quelques caractéristiques types d'objectifs modernes achromatiques et apochromatiques. Nous y avons joint le grossissement de l'oculaire qui doit y être associé pour obtenir la limite de résolution visuelle optimum.

Les objectifs type "métallographique" ont des caractéristiques analogues, avec :

Longueur de tube : 190 mm. Correction sans lamelle couvre-objet.

Ils sont établis en monture courte.

Objectifs apochromatiques.

Caractéristiques analogues aux achromatiques, mais avec une ouverture numérique supérieure de 0,05 environ à grandissement égal, pour les objectifs à sec.

L'ouverture maximum atteinte pour les objectifs à immersion est 1,4, avec des grandissements de 60 et de 90.

TABLEAUX XV bis OBJECTIFS ACHROMATIQUES
Longueur de tube 160 mm. Correction pour lamelle couvre-objet de 0,017 mm. d'épaisseur.

Grandissement	Ouverture numérique	Distance frontale mm.	Champ Objet mm.	Grossissement optimum de l'oculaire
OBJECTIFS A SEC.				
1,1 à 1,6	-	35 à 15	-	-
2,3	-	50	-	-
4	0,10	38	2	20 ×
8	0,22	8	1	20 ×
13	0,30	3,4	0,85	16 ×
28	0,60	1,1	0,40	15 ×
37	(1) 0,80	0,4	0,30	15 ×
60	(1) 0,90	0,3	0,22	10 ×
70	0,90	0,2	0,18	10 ×
OBJECTIFS A IMMERSION D'EAU				
6	0,11	36	2	15 ×
40	0,75	1,9	0,31	15 ×
90	1,18	0,07	0,14	10 ×
OBJECTIFS A IMMERSION D'HUILE DE CEDRE.				
95	1,30	0,17	0,14	12 ×
115	1,30	0,13	0,14	10 X

(1) On tend de plus en plus à limiter à 0,75 l'ouverture numérique des achromatiques puissants.

Enfin, il existe un type d'objectif à immersion à la monobromonaphtaline, dont l'ouverture numérique atteint 1,60, avec un grandissement d'objectif de 75.

Oculaires.

On ne trouvera d'une manière courante dans le commerce que les oculaires Huyghens ou Ramsden, construits pour les microscopes, de grossissements compris entre 5 et 30 et dont le champ apparent ne dépasse guère 30°. Il existe des oculaires à beaucoup plus grand champ (jusqu'à 70°) pour les instruments d'observation, mais ne figurant pas aux catalogues. Il faudra, pour les obtenir s'adresser aux constructeurs.

Remarque : Il arrive fréquemment qu'on ait besoin de lentilles cylindriques, simples ou corrigées. Il n'est pas inutile de signaler ici, que, exception faite pour les verres de lunetterie, ces lentilles doivent toujours être exécutées sur commande, et que leur qualité est en général médiocre. Il n'existe pas de fabrication organisée de lentilles cylindriques de précision.

CONSTRUCTION DE SYSTÈMES SPÉCIAUX

Le mieux est de s'adresser à un constructeur qui procédera dans les meilleures conditions au calcul de l'instrument et à sa réalisation correcte. Lorsqu'on est obligé d'avoir recours à un

façonnier, il faut lui spécifier, d'une part, les données et les cotes de la construction et, d'autre part, les tolérances. Ce dernier point est très important, parce que le prix de travail augmente considérablement quand la précision demandée croît (par exemple, dans le rapport de 1 à 10, ou même de 1 à 100). Une précision inutile grève lourdement un budget, sans avantage appréciable.

Le calcul d'une combinaison optique fournit les éléments de construction à indiquer au façonnier : indices de réfraction de la matière, rayons de courbure, épaisseurs dans le cas d'une lentille, toujours mesurée au centre de la lentille), diamètre, ou éventuellement forme extérieure. Dans le cas des prismes, on fournira les angles entre les surfaces, les dimensions de ces surfaces, en n'omettant pas d'indiquer les faces qui doivent être polies.

Le calcul devrait aussi permettre celui des tolérances sur les éléments de construction, mais, en dehors des lames planparallèles ou des surfaces utilisées pour les interférences, ce calcul est très laborieux et accessible seulement aux organismes possédant un bureau de calcul. Nous indiquerons donc, ci-après, quelques règles simples qui, sans être rigoureuses, permettent d'éviter des erreurs grossières; dans tous les cas, elles permettront d'obtenir de bonnes images.

1° Indices de réfraction. - Pour les systèmes visuels peu ouverts(F/8), on tolérera au maximum des variations d'indice de réfraction de $\pm 0,001$, à condition que le facteur de dispersion ne varie pas de plus de 0,5.

Pour les systèmes très ouverts, ou comportant des surfaces très courbées au contact avec l'air, il sera prudent de ne pas dépasser sur l'indice des variations de 0,0003 et sur le facteur de dispersion de 0,2.

Nous rappelons que les indices à introduire dans les calculs ne sont pas ceux des catalogues, mais bien ceux des feuilles spéciales accompagnant la livraison des verres, et qui peuvent différer de ceux des catalogues de quantités bien supérieures aux tolérances que nous venons d'indiquer. Ceci suppose que le verre est homogène. Les tolérances sur l'homogénéité du verre sont beaucoup plus sévères, et ne dépasseront pas 1 à 2×10^{-5}.

2° Rayons de courbure. - Si l'on excepte le cas où une distance focale imposée doit être réalisée d'une manière très exacte, la précision absolue à réaliser sur les rayons de courbure est donnée par la formule :

$$dR = K\left(\frac{R}{D}\right)^2$$

dR = précision cherchée, en millimètres.
R = Rayon de courbure de la surface.
D = Diamètre utile de la surface.

On prendra : K = 0,01 pour les objectifs :
K = 0,05 pour les verres d'oeil d'oculaires :
K = 0,2 pour les verres de champ placés au voisinage immédiat d'une image.

La formule précédente fournit la précision du rayon des calibres interférentiels dont, par définition, la surface sera rigoureusement sphérique. Il faut maintenant fixer les quantités dont les surfaces usinées pourront s'écarter de celles du calibre interférentiel; de l'écart permis dépendra la difficulté, donc le prix du travail. On peut adopter les règles suivantes, valables à condition que les surfaces usinées soient bien sphériques, ce dont l'ouvrier peut s'assurer facilement, même s'il subsiste quelques franges entre la surface et son calibre :

Pour les surfaces travaillant par réfraction, et normales à l'axe optique (surfaces de lentilles, faces d'entrée et de sortie de prismes), on tolérera de une frange à trois franges. Pour les surfaces planes inclinées sur l'axe optique, on tolérera de 0,4 frange, pour un angle d'incidence de 45°, à 0,2 frange, pour un angle de 60°. Pour les surfaces réfléchissantes dont l'axe de révolution coincide avec l'axe optique, on tolérera de 0,75 à 0,25 frange. Pour les surfaces planes inclinées sur l'axe optique (miroirs ou faces réfléchissantes de prismes), la tolérance variera entre 0,1 et 0,2 frange (teinte plate).

Enfin, pour une surface réfringente ou réfléchissante placée au voisinage immédiat d'une image, les tolérances pourront être multipliées par 20.

Une lame plan-parallèle, normale au faisceau et placée au voisinage d'une pupille, si la petite déviation imprimée au faisceau ne gêne pas, et à condition que les tolérance sur la planéité des surfaces soient respectées, pourra, sans inconvénient pour l'image, tolérer un angle donné en radians par la formule :

$$A = \frac{0,07}{O} ,$$

O étant le diamètre de l'objectif exprimé en millimètres.

La précision sur le parallélisme pourra être indiquée à l'ouvrier en nombre de franges entre les deux surfaces de la lame. Si la variation d'épaisseur entre les deux extrémités peut dépasser 3 microns, indiquer simplement "lame redressée à la pointe", ce qui indique que l'ouvrier peut utiliser pour le réglage du parallélisme un appareil mécanique à touche.

L'égalité des angles à 45° d'un prisme à réflexion totale sera réalisée avec la même précision; la tolérance sur l'angle à 90° peut être notablement plus grande, de l'ordre de 10 à 20'.

Pour les autres prismes, se renseigner auprès d'un constructeur.

Recommandation importante. Il est indispensable, si l'on veut éviter les grandes difficultés de taille, et par conséquent, des dépenses inutiles, de donner aux pièces optiques des épaisseurs suffisantes pour limiter les flexions au cours du travail.

Pour les pièces travaillant par réfraction, et de diamètre inférieur à 50 mm., prendre une épaisseur minimum au moins

égale à 1/5 du diamètre. Au delà, ne pas descendre au-dessous de 1/8 du diamètre. Pour les miroirs, l'épaisseur sera égale au moins à 1/6 du diamètre et si possible à 1/4.

CONSTRUCTION DE SYSTÈMES DE QUALITÉ COURANTE

Pour les systèmes non corrigés des aberrations par un calcul complet, ou lorsque les aberrations résiduelles sont très fortes (par exemple, pour les condenseurs à grande ouverture) ou encore lorsque l'on ne juge pas utile de corriger les aberrations, l'usage des calibres est inutile. L'ouvrier se fie alors aux rayons de ses outils, et la qualité de la surface, qui ne peut pas être contrôlée, peut varier beaucoup suivant son habileté.

Lorsqu'on a affaire à un praticien habile, on peut admettre que les rayons inférieurs à 100 mm. seront obtenus sans calibre avec une précision suffisante pour des systèmes de bonne qualité. Bien que la qualité des surfaces obtenues ne soit pas contrôlable, on obtiendra, dans le cas particulier indiqué, des résultats presque toujours satisfaisants.

Cette méthode de travail suffira en général pour tous les dispositifs d'éclairage ou photométriques, dans lesquels on utilise une source ponctuelle, et donnera souvent des résultats suffisants pour les appareils formant des images, lorsque le champ sera inférieur à quelques degrés, et l'ouverture plus petite que f/10. On devra s'attendre à des variations notables des longueurs focales obtenues par rapport à celles qui sont prévues (mais dépassant rarement 5%), ce qui n'a, dans la plupart des cas, pas d'importance.

Nous terminerons par quelques exemples de spécifications dans des cas simples :

Exemple I. - Trois cas de lames plan-parallèles.

Données :	Lame compensatrice d'un interféromètre (1).	Fenêtre d'entrée devant un objectif de 100mm. de diamètre.	Hublot d'observation à l'oeil nu (3).
Matière :	Borosilicate n_D= 1,5180, ν = 64, ou mieux, N° de fonte du verre livré	Borosilicate n_D = 1,5180, ν = 64 ou mieux, N° de fonte du verre livré.	Glace ordinaire.
Diamètre :	100 ± 0,1 mm.	100 ± 0,1 mm.	100 ± 0,1 mm.
Epaisseur :	20±0,0005 mm.	20 ± 0,1 mm.	suivant épaisseur de la glace dont on dispose mais < 6 mm.
Planéité :	teinte plate	1 frange	Travail sans calibre.

Parallélisme	Le plus voisin possible de la teinte plate.	±2',3, ou 36 franges par cm ou mieux, lame redressée à la pointe (2).	Parallélisme des surfaces naturelles de la glace.
Poli :	Sans gris, ni chair de poule.	Sans gris ni chair de poule.	Sans gris.

Remarques : 1) Cet exemple, fourni à titre d'indication, se rapporte au travail d'optique le plus difficile. Il nécessite un contrôle rigoureux de l'homogénéité de la matière, et des vérifications en cours de travail exigeant un matériel qui n'existe que dans des laboratoires et des maisons spécialisées auxquelles il serait indispensable d'avoir recours.

2) Lorsque la variation d'épaisseur dépasse 2 à 3 microns, le redressement "à la pointe" est procédé le plus rapide et le moins couteux.

3) On pourrait, dans ce cas, utiliser directement de la glace de planimétrie, qu'il suffirait de déborder au diamètre voulu, sans travailler les surfaces.

Exemple 2.- Un objectif à deux verres collés (Travail de précision).

$r_1 = +575,2 \pm 0,5$ $\quad e_2 = 5,0 \pm 0,1$ $\quad n_D = 1,6136$ $\quad \nu = 37$

$r_3 = -175,9 \pm 0,1$ $\quad e_4 = 8,0 \pm 0,1$ $\quad n_D = 1,5180$ $\quad \nu = 59$

$r_5 = -596,4 \pm 0,5$

Signe + pour les surfaces convexes vers la lumière incidente
Signe - pour les surfaces concaves vers la lumière incidente

Diamètre : 60 mm ±0,05.

Surfaces au calibre : à 1 frange.

Poli : sans gris, ni chair de poule.

Centrage : soigné, à la lumière.

Exemple 3. - Prisme à réflexion totale.

Dimensions des surfaces de l'angle droit : 30 × 30 ±1 mm.

Surfaces de l'angle droit : planéité à 3 franges.

Surface hypothénuse : teinte plate.

Tolérance sur l'angle droit : ±5'.

Tolérance sur les angles à la base : ±4'.

Remarque. Nous n'avons parlé ni des distances, ni du centrage des diverses lentilles constituant un appareil ou un montage. Nous indiquerons au chapitre suivant les méthodes utilisables pour effectuer les réglages. Dans le cas où un système optique doit prendre place dans un appareil mécaniquement construit, la qualité d'assemblage des lentilles est une question de mécanique qui n'est pas de notre ressort. Signalons cependant qu'il arrive fréquemment que le diamètre des lentilles s'ajuste mal avec le diamètre des barillets. On évitera cet inconvénient en confiant ces barillets à l'opticien, qui effectuera lui-même l'ajustage au mieux.

CHOIX ET USAGE DES INSTRUMENTS D'OPTIQUE

Il est important de connaître les performances que l'on peut demander à un instrument d'optique donné, ou inversement, de pouvoir choisir l'instrument le mieux adapté à la vision ou à l'enregistrement d'un objet donné.

C'est là un problème complexe, non entièrement résolu; voici quelques règles, sanctionnées par l'expérience, qui permettront de guider les tâtonnements inévitables. Elles ne sont applicables en toute rigueur qu'aux instruments bien corrigés, au voisinage du centre du champ.

INSTRUMENTS VISUELS A OCULAIRES

Lunettes, microscopes, viseurs.

La limite de résolution d'un instrument visuel à oculaire est donnée par les deux formules équivalentes :

$$S = \frac{s\,\omega}{\Omega} \; ; \qquad T = \frac{s\,\omega}{2n \sin u} \; ,$$

S = limite de résolution angulaire de l'instrument :
s = limite angulaire de l'oeil nu, diaphragmé au diamètre de l'anneau oculaire;

Ω = diamètre de la pupille d'entrée de l'instrument (qui peut être plus petite que l'ouverture libre de l'objectif, si le diamètre de l'anneau oculaire est plus grand que celui de la pupille de l'oeil :

ω = diamètre de l'anneau oculaire, exprimé en millimètres :

T = limite de résolution linéaire de l'instrument :

n sin u = ouverture numérique de l'objectif, qui peut être inférieure à l'ouverture numérique totale si le diamètre de l'anneau oculaire est plus grand que celui de la pupille de l'oeil.

On pourra donc dans tous les cas possibles, calculer la limite de résolution d'un instrument en mesurant au préalable celle de l'oeil nu, pour les diverses brillances et contrastes de l'objet, et pour les divers diamètres de la pupille de l'oeil correspondant aux diamètres d'anneaux oculaires possibles.

Pour les brillances normales de l'objet, supérieures à 10^{-2} bougies par centimètre carré, la valeur du produit $s\omega$, pour un observateur normal, est donnée en radians par la formule empirique :

$$s\omega = \left(\frac{0,059}{\gamma - 0,010} + 2,05\right)\left(\frac{\omega}{1,6} + \frac{0,8}{2\omega}\right) \times 0,000291$$

s est exprimé en radians, ω en millimètres.

Le contraste γ est donné par la formule :

$$\gamma = \frac{B - b}{B}$$

B = brillance des parties claires de l'image .

b = brillance des parties foncées de l'image ·

Connaissant les formules donnant le grossissement :

$$G = \frac{\Omega}{\omega} \text{ (lunettes)} \qquad G = \frac{250 \times 2n \sin u}{\omega} \text{ (microscopes)},$$

on aura les éléments voulus pour résoudre les problèmes qui pourraient se présenter.

Pour les brillances de l'objet inférieures à 10^{-2} stilb, on pourra déterminer directement les valeurs de s ou de $s\omega$ par des expériences préalables faites à l'oeil nu.

Dans le cas où l'appareil est utilisé pour effectuer des mesures, la précision des pointés est environ le 1/5 de la limite de résolution.

Voici quelques règles pour le choix des caractéristiques optima des instruments :

Il existe une infinité d'instruments de caractéristiques différentes susceptibles de donner la même limite de résolution. Parmi celles-ci, deux solutions sont intéressantes :

1° L'instrument susceptible de donner la limite de résolution la plus petite possible pour une valeur fixée du diamètre de l'objectif ou de l'ouverture numérique. Il correspond au cas où l'on veut tirer le maximum d'une pièce optique existante (cas du microscope ou des instruments astronomiques).

Pour les diverses brillances et contrastes de l'objet, on choisira un grossissement tel que les diamètres de l'anneau oculaire aient les valeurs du tableau suivant :

TABLEAU XVI

Diamètre en millimètres de l'anneau oculaire ω, en fonction de la brillance et du contraste de l'objet, l'objectif étant donné.

Brillances	1	10^{-4}	10^{-6}	$0,5 \times 10^{-8}$
Contrastes				
1	0,6 - 0,8	1,5	2,5	4
0,2	0,6 - 0,8	1,5	3,0	5
0,1	0,6 - 0,8	1,5	4,0	non perçu
0,04	0,6 - 0,8	2-3	non perçu	-
0,02	0,6 - 0,8	3-	-	-

Pour les brillances inférieures à 10^{-8} stilb, il conviendra de prendre un anneau oculaire égal au diamètre maximum de la pupille dans l'obscurité, soit 8 mm.

Lorsque l'instrument est utilisé pour l'observation d'objets présentant tous les contrastes possibles (observation terrestre, planétaire ou microscopique), on adoptera le diamètre d'anneau oculaire correspondant au plus faible contraste.

2° Dans le cas où l'on n'est pas limité par le diamètre ou l'ouverture numérique de l'objectif, on choisira l'instrument de grossissement tel que l'anneau oculaire soit égal au diamètre de

la pupille naturelle de l'oeil observant l'objet. C'est ainsi que l'on obtient la plus petite limite de résolution possible avec un instrument dont le grossissement est imposé. A égalité de limite de résolution et pour un champ apparent donné de l'oculaire, cet instrument fournit un champ objet plus grand (double dans le cas des brillances diurnes) que celui correspondant à la première solution, et une clarté plus grande.

Le tableau XVII fournit les valeurs des diamètres d'anneaux oculaires, à adopter en fonction de la brillance et du contraste de l'objet.

TABLEAU XVII

Diamètres en millimètres de l'anneau oculaire ω, en fonction de la brillance et du contraste de l'objet, le grossissement étant donné.

Brillances (stilb)	1	10^{-4}	10^{-6}	10^{-8}
Contrastes				
1	2	2,5	4	8
0,2	2	2,5	6	8
0-1	2	3,	8	non perçu
0,04	2	4-	non perçu	-
0,02	2	6	-	-

Il en résulte la nécessité de très gros instruments pour l'observation terrestre et astronomique à basse lumière, en raison de la très mauvaise acuité de l'oeil en vision de nuit.

Le tableau XVIII fournit, pour un oeil normal et une lunette munie d'un objectif de 100 mm. de diamètre, les valeurs de la plus petite limite de résolution possible S, en secondes d'arc, du grossissement G qui lui correspond, et du rapport A entre la limite de résolution de l'oeil nu avec sa pupille naturelle et celle de l'oeil armé de l'instrument, ceci pour quelques valeurs de la brillance et du contraste de l'objet (voir tableau XVI les valeurs correspondantes de ω).

TABLEAU XVIII

Brillances (stilb)	1			10^{-4}			10^{-6}			$0,5 \times 10^{-8}$		
Contrastes	S	G	A	S	G	A	S	G	A	S	G	A
1	1"2	130-	65	1"8	67	60	30"	40	30	210"	25	22
0,2	1"4	130	65				120"	33	28	570"	20	18
0,1	1"6	130	65	6"7	67	60	273"	25	20			
0,04	2"	130	65									
0,02	4"7	130	65	63"	33	27						

Pour un objectif de diamètre différent, il suffit de diviser S et de multiplier G et A par le diamètre de l'objectif exprimé en décimètres.

Le tableau XIX fournit les valeurs de la limite de résolution linéaire minimum T, et G et de A, pour un système d'ouverture

numérique 1. Pour une ouverture numérique différente, on divisera T et on multipliera G et A par l'ouverture numérique. Rappelons que les plus grandes ouvertures numériques ne dépassent pas 1,40, et exceptionnellement 1,60; T est exprimé en microns.

TABLEAU XIX

Brillances (stilb)	1			10^{-4}			10^{-6}			$0,5 \times 10^{-8}$		
Contrastes	S(μ)	G	A	S	G	A	S	G	A	S	G	A
1	0,29	710	350	0,44	330	300	7,3	200	150	48	125	110
0,2	0,34	-	-				29	170	140	138	100	90
0,1	0,39	-	-	1,6	330	300	66	125	100			
0,04	0,48	-	-									
0,02	1,1	-	-	15	170	140						

Nous rappelons que les valeurs ci-dessus, rapportées à un observateur moyen, peuvent varier d'un observateur à l'autre, surtout aux basses brillances .

INSTRUMENTS PHOTOGRAPHIQUES

La limite de résolution des instruments photographiques est déterminée par les phénomènes de diffraction, si l'ouverture est faible, par la granulation de l'émulsion, si l'ouverture est plus grande. Cette dernière varie beaucoup en fonction du mode de développement et de séchage, et de la nature de l'émulsion; les résultats des études d'émulsion ne sont pas toujours concordants. Nous indiquons ci-dessous une formule et des procédés qui, sans être rigoureux, fourniront des ordres de grandeur destinés à orienter des essais plus précis.

En posant $n = \frac{f}{\Omega}$, f étant la longueur focale de l'objectif, Ω le diamètre de sa pupille d'entrée en millimètres, S la limite de résolution angulaire de l'objectif pour un objet à grande distance en radians, T sa limite de résolution linéaire, pour un objet à distance finie, Γ étant dans ce cas le grandissement de l'objectif on a :

$$S = \frac{Kn + g}{f} \qquad T = \frac{Kn + g}{\Gamma}$$

K est un terme faisant intervenir le diamètre de la tache de diffraction et le minimum de contraste perceptible par l'émulsion; on peut prendre, en première approximation, K égal à 0,8 micron.

g est la limite de résolution propre à l'émulsion, qu'on peut admettre de 30 à 40 microns pour les plaques extra-rapides, 20 microns pour les émulsions photographiques courantes dites à grain fin, 10 à 15 microns pour les émulsions positives, 2 à 5 microns pour les émulsions au collodion, et enfin de quelques dixièmes de micron pour les émulsions "Goldberg" ou les plaques Kodak "Maximum Resolution" (émulsions Lippmann sensibilisées et rendues orthochromatiques).

Ces données sont valables pour des méthodes de développement donnant la finesse de grains maximum. Avec un développement

quelconque, on pourra obtenir une granulation 1,5 et même deux fois plus grande.

Dans tous les cas où il serait nécessaire de connaître avec précision les propriétés résolvantes d'une émulsion, on procédera comme suit :

Au moyen d'un objectif type astronomique de très courte distance focale (par exemple 50 mm.) photographier des mires à pas variable, et en déduire la limite de résolution, pour une ouverture supérieure ou égale à f/10 et une ouverture inférieure ou égale à f/50. Reporter les valeurs S et f obtenues sur un graphique en ordonnées, et en abscisses les valeurs correspondantes de n. L'ordonnée à l'origine de la droite joignant les deux points fournit la valeur de g, le coefficient angulaire de la droite la valeur de K. Pour que cette détermination ait un sens, il est indispensable :

1° Que l'objectif utilisé soit pratiquement sans aberration.

2° Que la mise au point de l'image soit rigoureusement exacte.

3° Que les traitements subis par l'émulsion (nature, température, durée de développement, etc... et le noircissement soient identiquement ceux qu'on se propose d'utiliser postérieurement.

INSTRUMENTS DE PROJECTION

Pour obtenir par projection la totalité desdétails d'une image, on se conformera aux règles suivantes :

1° La granulation de l'écran (en particulier s'il s'agit d'un verre dépoli ou de grands écrans à tissage grossier, ou d'écrans lenticulaires) doit être nettement inférieure ou au plus égale au rayon de la tache de diffusion, image d'un point sans dimension fournie par le système de projection.

2° L'observateur doit être à une distance de l'écran supérieure ou au moins égale à celle pour laquelle la granulation de l'écran cesse d'être perceptible (on pourra adopter deux fois cette distance).

3° L'observateur doit être à la distance de l'écran telle que le plus petit détail perceptible sur l'écran soit égal à la limite de résolution de l'oeil observant l'écran. Si l'observateur est plus rapproché, l'image perd sa netteté sans perdre de détails, si l'observateur est plus éloigné, elle perd des détails.

4° L'éclairement de l'écran supposé d'albedo égal à 1 doit être compris entre 120 et 150 lux (ou sa brillance entre 4 et 5×10^{-3} stilb). Pour les éclairements plus faibles, l'acuité visuelle pour les faibles contrastes diminue très rapidement. On évite de dépasser 150 lux, sauf si le champ éclairé est très étendu, à cause de l'effet fatigant du contraste entre le fond obscur et l'écran.

USAGE DES INSTRUMENTS

Eclairage intense des corps transparents - Nous envisageons ici le cas des objets transparents ou réfléchissants caractérisés par des variations locales de l'absorption, ou de la réflexion (diapositives, coupes microscopiques colorées, échantillons métallographiques etc...), a l'exclusion de toute variation de phase importante. De tels objets sont dits "objets d'amplitude".

Quel que soit l'instrument utilisé, les principes des dispositifs sont les mêmes. Pour obtenir un éclairement correct et le plus intense possible, deux conditions doivent être réalisées :

a) L'objet doit être uniformément éclairé.

b) La pupille d'entrée de l'instrument doit être entièrement couverte par le faisceau éclairant.

Deux cas sont possibles :

- Si la source est uniforme (lampe opale, lampe pointolite, arc électrique) on projette l'image de la source S dans le plan de l'objet O, avec un agrandissement suffisant pour que l'image de la source couvre entièrement l'objet. L'angle d'ouverture u' du faisceau formant l'image de la source doit être égal à l'angle d'ouverture u de l'objectif. Le dispositif formant l'image de la source ou condensateur, peut être, soit un miroir elliptique (fig. 10 a) soit un ensemble de lentilles sphériques ou asphériques (pour les grandes ouvertures) fig. 10b. Il est essentiel que le condenseur soit suffisamment corrigé, au moins de l'aberration sphérique (et en plus de la coma s'il est très ouvert), sinon l'écran ne serait pas uniformément éclairé et perdrait de la lumière.

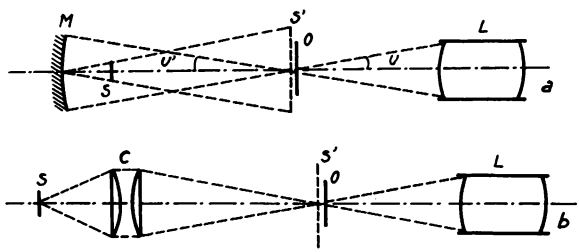


Fig. 10. - Eclairage d'un objet par une source uniforme.
a) Avec un miroir elliptique.
b) Avec des lentilles.

- Si la source n'est pas uniforme (filament de lampe à incandescence, lampe à mercure à haute tension), on projette l'image de la lampe dans la pupille avant de l'objectif, au moyen d'un condenseur à lentilles, placé tout contre l'objet. On aura le maximum de lumière en utilisant une lampe à filament disposé en grille carrée, et en choisissant le condensateur de manière que l'image du filament remplisse aussi exactement que possible l'ouverture de l'objectif (fig. 11).

Ces dispositifs sont applicables en particulier à la photographie et à la projection au moyen de tous appareils y compris

les microscopes. Le cas particulier d'un spectrographe se traitera exactement de la même manière, la fente jouant alors le rôle d'objet et l'objectif du collimateur, ou mieux le prisme, le rôle de l'objectif. Il sera facile de s'assurer, en plaçant l'oeil dans le spectre, de la manière dont le prisme est couvert par le faisceau éclairant.

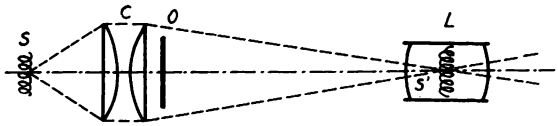


Fig. 11. - Eclairage d'un objet par une source non uniforme.

Eclairage des corps opaques diffusants. - Dans le cas où le système à éclairer est placé assez loin de l'appareil et où l'obliquité de l'éclairage ne gêne pas, on peut projeter sur l'objet l'image d'une source brillante, au moyen d'un miroir ou d'un condenseur à lentilles (fig. 12). Si la source n'est pas uniforme, on obtiendra un éclairage très uniforme en utilisant le "condenseur à relais" (fig. 13). La lentille L_1 projette sur la lentille L_2, l'image de la source, et la lentille L_2 projette sur l'objet l'image parfaitement uniforme, de la lentille L_1. Il y a intérêt à ce que l'image de la source couvre aussi complétement que possible la lentille L_2, celle-ci ayant elle-même le plus grand diamètre possible.

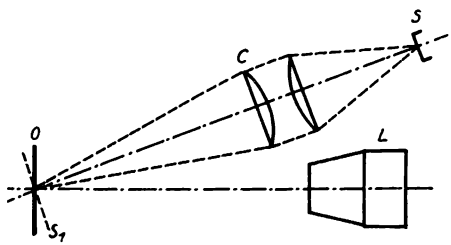


Fig. 12. - Eclairage d'un corps opaque par une source uniforme.

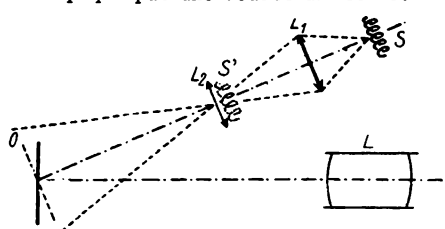


Fig. 13. - Condenseur à relais.

Dans le cas où l'objet est de petites dimensions, on obtient un éclairage très intense en projetant sur l'objet O, l'image d'une source uniforme S, au moyen d'un miroir sphérique, ou mieux elliptique M, percé d'un trou pour livrer passage à l'objectif de l'instrument (miroir de Liberkühn). On obtient ainsi un éclairage symétrique (fig. 14).

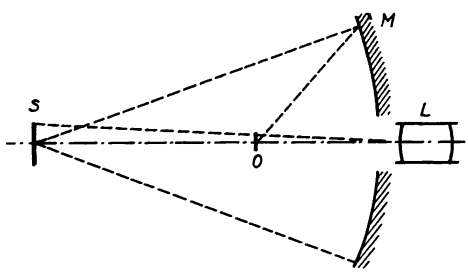


Fig. 14. - Eclairage avec un miroir concave.

Eclairage normal des corps réfléchissants. - Dans les cas où l'on veut obtenir un éclairage exactement normal, ce qui est

indispensable pour les corps réfléchissants, les dispositifs suivants peuvent être utilisés :

Si la distance entre l'objet et l'appareil le permet, on éclaire l'objet O au moyen d'une lame semi-transparente G inclinée à 45°, et placée entre l'objectif et l'appareil. On peut utiliser une source large sans condenseur ou, si l'éclairage doit être très intense, une source brillante, à laquelle on associera l'un ou l'autre des dispositifs condenseurs décrits pour l'éclairage des objets transparents, suivant que la source est ou non uniforme (fig. 15).

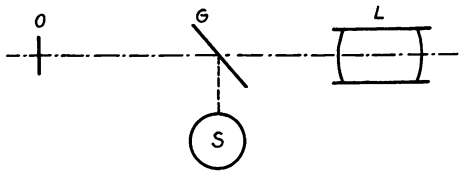


Fig. 15. - Eclairage normal par lame semi-transparente.

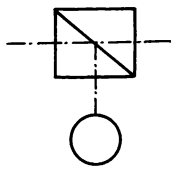


Fig. 16. - Eclairage normal par prisme de Govi.

La lame inclinée introduit de l'astigmatisme qui pourra devenir gênant lorsque l'ouverture de l'objectif est grande. On pourra, dans certains cas, le réduire en prenant une lame L très mince (couvre-objet de microscope ou lame de mica) ou le supprimer avec un prisme de Govi (cube de verre à face diagonale semi-métallisée), qui, par contre, introduira de l'aberration sphérique (fig. 16).

Un autre dispositif consiste à utiliser un prisme à réflexion totale couvrant la moitié de l'objectif, le faisceau réfléchi passant par la moitié libre, ou un prisme à 90° à face en toit, qui a l'avantage de ne masquer qu'un secteur de 60° (fig. 17).

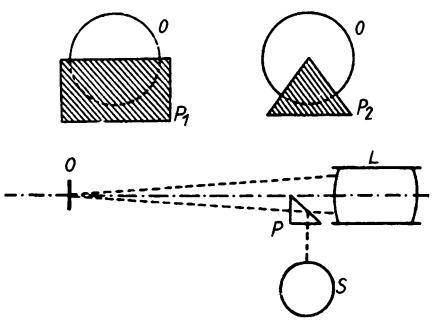


Fig. 17. - Eclairage normal par prisme à réflexion totale, ou en toit.

Dans le cas de l'observation microscopique et spécialement pour la métallographie, on peut ne pas avoir de place pour une lame ou un prisme entre l'objectif et l'objet. On emploiera alors des dispositifs identiques aux précédents, la lame ou le prisme étant placés au delà de l'objectif. Afin de diminuer les reflets par réflexion sur les surfaces de l'objectif, qui sont la grande difficulté de ce mode d'éclairage, on placera le prisme le plus près possible des surfaces, l'image de la source se formant dans son voisinage immédiat.

Le dispositif par prismes ne doit pas être employé avec les objectifs puissants, sauf s'ils sont apochromatiques.

Le traitement des surfaces pour diminuer les réflexions, en affranchissant de la lumière parasite, permet d'utiliser,

le dispositifs à lame, en se servant des montages fondamentaux que nous avons décrits. On obtient ainsi un excellent éclairage.

Eclairage à fond noir. On trouvera dans divers ouvrages la description des dispositifs utilisés pour l'éclairage à fond noir du microscope. Les divers dispositifs correspondants existent couramment dans le commerce. Se conformer pour leur usage aux notices des constructeurs.

Nous indiquerons ci-dessous un mode opératoire facile à mettre en oeuvre avec les moyens dont on dispose au laboratoire. On éclaire l'objet (fig. 18a) par le dispositif de la figure 10, en utilisant une source S étroite (arc, pointolite, ou petit trou éclairé par un arc), mais le condenseur forme l'image de la source un peu en avant de l'objectif. On obture complètement l'image de la source par un diaphragme D et l'image instrumentale est alors formée uniquement par les faisceaux diffractés passant à côté du diaphragme D. La sensibilité sera d'autant plus grande que l'image en D sera plus petite; il faudra donc, d'une part, utiliser une source petite, dont très brillante si l'on veut avoir de la lumière (arc électrique) et d'autre part, utiliser un condenseur C bien corrigé des aberrations sphériques et chromatiques (par exemple un objectif photographique à grande ouverture, ou un condenseur de microscope aplanétique et achromatique).

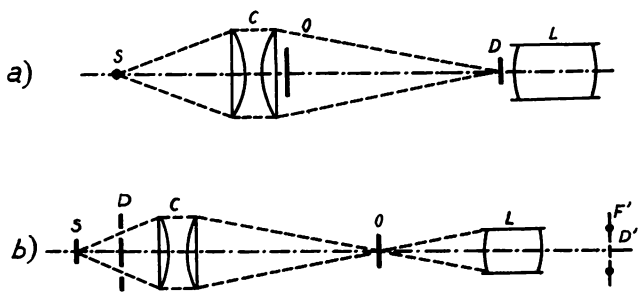


Fig. 18. - Eclairage à fond noir.

Une autre variante, due à Zernicke, applicable également aux objectifs de microscope puissants, peut être utilisée (fig. 18b) On utilise une source large et uniforme (cratère d'arc, pointolite, lampe à ruban) dont l'image est projetée dans le plan de l'objet.

Aux environs du foyer objet du condenseur, on dispose un diaphragme annulaire D, dont l'objectif de l'instrument donne une image en F', sous forme d'un cercle très brillant. On masque complètement ce cercle par un diaphragme annulaire D' opaque, de manière à supprimer complètement le faisceau direct, et à ne laisser passer que les rayons diffractés ou réfractés en dehors de l'image.

Le diamètre de l'anneau D transparent sera choisi de manière que son image soit un peu inférieure au diamètre utile de l'objectif de l'appareil. Celui de l'anneau D' opaque sera tel qu'il recouvrira complètement l'image brillante de D, mais en la

débordant le moins possible. Ces diaphragmes sont obtenus facilement en déposant par évaporation dans le vide, sur une lame plan-parallèle munie d'écrans appropriés, une couche métallique opaque. La largeur des anneaux D et D' sera comprise entre 1/10 et 1/20 de leur diamètre.

On fera varier le diamètre de l'image D, pour l'adapter exactement à celui de D', en déplaçant D longitudinalement, ce qui entraîne un déplacement correspondant de D'. On obtiendra l'obturation exacte du faisceau direct en déplaçant D ou D' dans un plan de front. Dans le cas d'objectifs de microscope puissants, D' sera placé au voisinage immédiat de la lentille de sortie de l'objectif.

Il est essentiel, pour obtenir un fond bien noir, que les surfaces du condenseur soient parfaitement polies (exemptes de "gris") et propres, et que le verre soit exempt de défauts locaux d'homogénéité; sinon, la lumière diffractée ou réfractée par les surfaces et le verre viendra noyer l'image.

Protection des objets contre l'échauffement. Lorsqu'on utilise des sources intenses, l'arc en particulier, on risque de détruire l'objet par échauffement, ou même de l'enflammer s'il s'agit de films. On peut éviter ces inconvénients par les procédés suivants :

1° On projette, au moyen d'une buse plate, un violent courant d'air balayant tangentiellement l'objet (applicable seulement aux films).

2° On supprime la plus grande partie du rayonnement infrarouge de la source, en disposant une cuve à eau de quelques centimètres d'épaisseur entre la source et l'objet, de préférence contre le condenseur. Utiliser de l'eau non calcaire, bouillie pendant un quart d'heure, pour éviter la formation de bulles, ou de l'eau fraichement distillée. On obtiendra une efficacité notablement meilleure en dissolvant dans l'eau légèrement acidulée quelques cristaux de sulfate de cuivre, en assez petite quantité pour que la coloration soit à peine visible. Il existe dans le commerce des verres dits "athermals", légèrement jaunes, produisant le même effet, mais il est nécessaire de les immerger dans une cuve à eau pour éviter qu'ils ne se brisent par échauffement. Il peut arriver que l'eau de la cuve s'échauffe au point de bouillir; il est facile de l'éviter en établissant une circulation par thermosiphon avec un récipient de quelques litres muni de tubulures à la base et à la partie supérieure.

3° On trouve dans le commerce des filtres à couches minces qui, réfléchissant l'infrarouge et laissant passer seulement le visible; protègent efficacement les préparations, sans subir eux-mêmes des élévations de température dangereuses.

MISE AU POINT DES INSTRUMENTS VISUELS

Le réglage de la mise au point d'un instrument visuel semble si évident et naturel qu'on ne lui prête en général que peu d'attention. Or c'est là une question d'importance capitale, dont

dépend la plus ou moins grande fatigue qu'éprouver a l'observateur au cours de son travail, et même, si ce dernier doit être de longue durée, la conservation de la vue de l'observateur; de plus les défauts de mise au point peuvent être la source de grosses erreurs dans les opérations métrologiques.

Deux cas sont à considérer :

a) Instruments d'observation ne comportant pas de repère matériel (croisée de fils, ou graticule quelconque) dans le plan de l'image.

Les observateurs, et particulièrement les jeunes, qui possèdent une faculté d'accommodation ayant gardé toute sa souplesse, règlent instinctivement la mise au point de manière à amener l'image le plus près possible de l'oeil (au ponctum proximum). Il en résulte une fatigue intense, génératrice de troubles de la vision et de maux de tête, et qui oblige souvent à interrompre le travail. Il est indispensable, pour réduire cette fatigue au minimum, de régler l'instrument de manière que l'image se forme à une distance suffisante de l'oeil, ou mieux, à son ponctum remotum. Pour cela, effectuer la mise au point très lentement, en éloignant progressivement l'appareil de l'objet (ou en sortant l'oculaire), s'arrêter dès que l'image devient moins nette, et rapprocher l'appareil ou l'oculaire de la quantité juste suffisante pour retrouver la netteté. Vérifier en passant brusquement de la vision instrumentale à celle d'un objet situé à au moins un mètre de distance, que ce dernier objet est vu nettement ce qui indique que l'image est située à une distance suffisante. L'expérience montre que même pour des sujets bien entraînés, il est difficile de faire une mise au point correcte sans observer les précautions indiquées.

b) Instruments portant un réticule, en vue de mesures d'angles ou de longueurs.

Deux réglages doivent être simultanément réalisés;

1° Régler la mise au point de l'oculaire sur le réticule, comme indiqué au paragraphe précédent.

2° Faire coulisser la pièce qui porte l'ensemble du réticule et de l'oculaire, de manière à amener le réticule dans le plan de l'image.

La mise en coïncidence du réticule et de l'image peut être appréciée de deux manières :

1° Par netteté : en faisant varier le coulissage, on amène l'image à être vue aussi nettement que le réticule. Cette manière de faire est la plus efficace pour les instruments travaillant en lumière blanche (qui possèdent toujours des résidus de chromatisme) et, en général, lorsque l'instrument n'est pas parfaitement corrigé.

2° Par absence de parallaxe : en déplaçant l'oeil alternativement derrière l'oculaire, l'image doit rester immobile par rapport au réticule. On utilisera ce procédé en lumière monochromatique, avec un instrument bien corrigé et dont l'anneau oculaire n'a pas un trop petit diamètre.

Si, la parallaxe étant supprimée, l'image et le réticule ne sont pas au point en même temps, la mise au point de l'oculaire sur le réticule n'est pas correcte.

Deux recommandations importantes :

Lors de la mise au point sur le réticule, dépointer franchement l'image, sinon l'accommodation de l'oeil saute involontairement du réticule à l'image, et l'opération peut être manquée. Pour la même raison, lorsqu'on amène le réticule dans le plan de l'image, porter toute son attention sur le réticule, sans cesser de le fixer pendant un seul instant.

Des précautions spéciales devront être prises lorsqu'on doit pointer successivement des plages monochromatiques de diverses longueurs d'onde (par exemple des raies spectrales). Par suite du chromatisme résiduel de l'objectif et de l'oculaire, et du chromatisme de l'oeil, la mise au point varie aux extrémités rouge et surtout violette du spectre. Il faudra recommencer entièrement les deux opérations de mise au point dès que la parallaxe commence à se manifester. Si, outre les radiations extrêmes, la source contient des radiations situées au milieu du spectre, et auxquelles l'oeil est très sensible, il faudra éviter l'introduction de toute lumière parasite dans le champ. En effet, cette dernière éclaire le réticule avec une longueur d'onde différente de celle de l'objet, et son image, par suite du chromatisme de l'instrument, ne se trouvera pas dans le même plan que l'objet. La mise au point effectuée dans ces conditions n'aura aucun sens.

Mise au point d'un instrument binoculaire. Cette opération, qui semble très familière à beaucoup de personnes, est difficile à réaliser correctement pour permettre une observation de longue durée sans fatigue.

1° Régler les deux corps de l'instrument à l'écartement des yeux de l'observateur. Pour cela mesurer son écart pupillaire (voir plus loin) et placer la division correspondante de l'appareil à la valeur obtenue.

2° Effectuer séparément, avec soin, la mise au point des deux corps de l'appareil.

3° Vérifier, en masquant alternativement l'un et l'autre oeil, que les deux images sont vues également nettes. Sinon, retoucher en conséquence.

Il est important, dans les instruments dont les axes oculaires sont parallèles, que l'image soit rejetée aussi loin que possible, sinon on rompt la relation entre la convergence et l'accommodation des yeux, ce qui, pour les observateurs non spécialement entraînés depuis longtemps, est la cause d'une fatigue supplémentaire.

Les instruments à axes convergents (microscopes de Greenough) exigent, pour la même raison, que l'image soit réglée à 25 ou 30 cm. de l'oeil.

Dans le cas où il n'est pas possible de mesurer l'écart pupillaire, effectuer la mise au point des deux corps, puis agir sur le réglage d'écart d'yeux, de manière que la vision soit

aussi confortable que possible. On reconnaitra que le réglage est correct à ce que, en déplaçant la tête bien parallèlement à la ligne des yeux, les deux champs s'éteignent en même temps.

Mesure de l'écart pupillaire. Cette mesure est à faire en vue de l'emploi d'un instrument à axes parallèles seulement : (les instruments à axe convergent n'ont pas de graduation d'écart d'yeux).

L'observateur fixe un point éloigné, bien éclairé (cheminée se détachant sur le ciel, à une distance supérieure à 20 mètres). Sa tête est immobilisée par appui frontal ou postérieur. On place le plus près possible de l'oeil une règle divisée. Un aide, placé à une quarantaine de centimètres de distance, la tête bien fixe, lit, avec son oeil droit, la division correspondant au centre de l'oeil gauche de l'observé, et vice versa. On recommence plusieurs fois et on prend la moyenne. On aura ainsi la valeur cherchée à quelques dixièmes de millimètre près.

MISE AU POINT D'UN APPAREIL PHOTOGRAPHIQUE

1° Instruments corrigés pour le spectre visible. On obtiendra en général des résultats satisfaisants en opérant visuellement sur un verre dépoli, pas trop finement douci. Une méthode plus précise consistera à remplacer le verre dépoli par un verre transparent, sur lequel on a déposé des grains de lycopode, ou mieux laissé subsister des portions d'une argenture partiellement effacée. On amène l'image à son maximum de netteté en observant avec une loupe ou un microscope faible pointé sur le bord de l'argenture ou les grains de lycopode. Mais il faut bien vérifier que l'anneau oculaire de la loupe ou du microscope soit plus petit que la pupille de l'oeil, sinon cette dernière diaphragmerait l'objectif. On améliorera le résultat en filtrant la lumière par un filtre bleu ne laissant pas passer les radiations vertes et de longueurs d'ondes supérieures, pour l'usage de plaques non orthochromatiques; par un filtre bleu vert coupant le rouge, pour les plaques orthochromatiques : par un filtre jaune coupant le bleu, pour les plaques panchromatiques.

Lorsqu'on fait varier l'ouverture d'un objectif très ouvert, la mise au point peut subir de légers changements; opérer avec le diaphragme de travail, et non pas, comme on le fait souvent, à pleine ouverture.

On vérifie au besoin le résultat, en effectuant une série de clichés à mises au point échelonnées de part et d'autre de la mise au point visuelle.

Lorsqu'on doit utiliser, en particulier pour des applications métrologiques, un champ relativement étendu dans lequel la netteté doit être aussi uniforme que possible, on ne devra pas régler l'appareil pour le centre du champ, mais chercher, parmi les diverses positions de la plaque, celle qui correspond à la meilleure netteté de l'ensemble du champ. Il est en effet très rare, même pour de bons objectifs, que le champ soit rigoureusement plan.

On dégrossira cette opération visuellement, en étudiant la répartition de la mise au point dans le champ, puis on terminera par tâtonnements photographiques.

Rappelons les données courantes en photographies :

Ouverture du diaphragme. - Les diaphragmes sont numérotés en nombre d'ouverture : $n = \frac{f}{\Omega}$, Ω étant le diamètre de la pupille d'entrée, f, la longueur focale de l'objectif. La progression de ces nombres est choisie de manière que le temps de pose varie d'un facteur 2 quand on passe d'un numéro au suivant.

La profondeur de foyer ΔF d'un dispositif photographique, c'est-à-dire, le déplacement qu'on peut donner à la couche sensible de part et d'autre de la mise au point optimum, sans que la netteté en souffre, est donnée en millimètres, par la formule approximative :

$$\Delta F = 0,0004.\ n^2 + g\,n = n\,(0,004\ n + g)$$

n étant le nombre d'ouverture, et g la granulation exprimée en millimètres.

2° Instruments corrigés pour l'infrarouge ou l'ultra-violet. - On peut procéder dans les deux cas par tâtonnement photographique. Cependant, on abrégera beaucoup les opérations dans l'ultraviolet en observant visuellement l'image formée sur un écran fluorescent, constitué par exemple par une plaque photographique dont on a dissout le sel d'argent dans l'hyposulfite, et qu'on a ensuite imprégnée de fluorescéine (la sensibilité est meilleure en l'utilisant encore humide).

USAGE DU MICROSCOPE

Le microscope biologique utilise, outre les objets d'amplitude que nous avons définis p. 275 (Eclairage intense des objets transparents), des "objets de phase" dont toutes les parties sont également transparentes, mais comportent des variations d'indice qui introduisent des variations de phase sur des ondes qui les traversent. Alors que les objets de phase purs sont très fréquents (tissus animaux ou végétaux vivants, défauts d'homogénéité des matières transparentes, microdéfauts des surfaces polies etc...), il est rare qu'un objet d'amplitude ne présente pas en même temps des variations de phase (tissus animaux ou végétaux colorés, émulsions photographiques etc...)

Observation des objets d'amplitude.

La principale difficulté réside dans le réglage correct de l'éclairage. La présence des défauts de phase impose des prescriptions qui diffèrent quelque peu de celles de la page 275, relatives aux objets d'amplitude purs.

Cet éclairage doit être tel que le faisceau issu du condenseur soit centré sur l'objectif et on couvre une partie plus ou moins grande suivant la nature de l'objet observé.

1° Avec le condenseur, utiliser toujours le miroir plan placé sous la platine.

2° Remonter à fond le condenseur, de manière que sa face plane supérieure vienne presque au contact de la lame porte-objet.

3° Pour vérifier son centrage : mettre au point sur une préparation transparente, enlever l'oculaire, regarder l'objectif et s'assurer qu'il est bien rempli de lumière; puis fermer le diaphragme du condenseur de manière à réduire un peu l'ouverture de l'objectif; on verra immédiatement si le contour de l'image du diaphragme est excentré par rapport au contour de la lentille arrière de l'objectif et, si besoin est, on effectuera le centrage au moyen des vis correspondantes du condenseur.

4° Régler l'ouverture du diaphragme de manière à obtenir la meilleure vision de l'objet; cet ouverture peut du reste varier aux différents points d'une préparation. Mais le diamètre de l'image du diaphragme ne doit jamais dépasser celui de la lentille arrière de l'objectif, sous peine de voiler l'image.

Pour l'observation visuelle, on prendra comme source, soit une lampe opale, soit une lampe d'éclairage microscopique munie d'un écran opale, soit le ciel.

Pour la photographie, la source la mieux adaptée est la lampe pointolite ou la lampe à ruban de tungstène, dont on projette l'image dans le plan de la préparation. Si l'image est trop petite pour couvrir le champ, placer la source au foyer d'une lentille de distance focale suffisamment courte.

Si l'on utilise les dispositifs d'éclairage vendus dans le commerce, avec lampe à filament boudiné, régler la mise au point de la lentille du dispositif de manière que le champ soit bien uniforme. L'image du filament doit être projetée dans le diaphragme du condenseur. En ôtant l'oculaire, on devra voir l'image du filament dans l'objectif, le couvrant aussi complètement que possible. L'image de la lentille du système d'éclairage sera formée dans le plan de l'objet, par réglage de la mise au point du condenseur, et son diamètre sera réduit au moyen de son diaphragme iris, (diaphragme de champ) de manière que l'image de ce diaphragme soit juste égale au champ objet.

Recommandation pour l'usage des objectifs à immersion. Un objectif à immersion à huile de cèdre ne travaillera avec sa pleine ouverture que si deux conditions sont simultanément remplies :

1° On place du liquide d'immersion entre la lame porte-objet et la face supérieure du condenseur (immersion du condenseur).

2° Le milieu compris entre la lame porte-objet et la lamelle couvre-objet a le même indice que le liquide d'immersion.

Si le condenseur n'est pas immergé ou si le milieu entre la lame et la lamelle est l'air, un objectif d'ouverture numérique 1,33 travaillera en réalité avec une ouverture de 0,86.

Si, même avec un condenseur immergé, le liquide entre la lame et la lamelle est de l'eau ou un liquide organique, le même objectif aura son ouverture réduite à 1,0. Il y a alors avantage à

utiliser un objectif à immersion d'eau. Beaucoup d'usagers du microscope n'immergent pas le condenseur : cela a l'inconvénient d'imposer une limite supérieure, souvent trop faible, à l'ouverture du faisceau éclairant. Nous pensons qu'il est préférable d'immerger le condenseur, et de chercher ensuite son ouverture optimum par la manoeuvre du diaphragme iris.

Autres recommandations. Les objets apochromatiques doivent être associés à des oculaires spéciaux, dits compensateurs, les combinaisons à utiliser étant indiquées par les constructeurs; sinon l'image sera de plus en plus mauvaise à mesure qu'on s'écarte du centre du champ, par chromatisme de grandissement. Il n'y a pas intérêt à dépasser, pour l'observation visuelle, des grossissements donnant des anneaux oculaires compris entre 0,5 et 0,7 mm., ou, ce qui revient au même, à dépasser des grossissements compris entre 700 et 1 000 fois l'ouverture numérique.

Pour obtenir sur cliché photographique la totalité du pouvoir de résolution de l'objectif, le grossissement doit être tel que l'ouverture du faisceau incident sur la plaque soit au plus égale à f /100. Si par exemple, l'anneau oculaire a 1 mm. de diamètre, la chambre photographique utilisée doit avoir un objectif d'au moins 100 mm. de longueur focale.

Le cliché ainsi obtenu ne révèlera la totalité de ses détails à l'oeil nu, observant à une distance de 30 cm., que s'il est lui-même agrandi au moins 3 fois, ou observé avec une loupe de grossissement 3. Si l'on veut que l'image photographique puisse révéler la totalité de ses détails par examen à l'oeil nu placé à une trentaine de centimètres de distance, il faudra que la distance focale de l'objectif de la chambre photographique soit au moins égale à 300 fois le diamètre de l'anneau oculaire. Si ce dernier ne peut être mesuré, on le calculera par la formule :

$$\omega = \frac{500\, n \sin u}{G} ,$$

ω = diamètre de l'anneau oculaire exprimé en mm.

n sin u = ouverture numérique de l'objectif.

G = grossissement du microscope utilisé visuellement en prenant pour oculaire l'objectif de la chambre photographique.

Pour la photographie avec objectifs achromatiques, utiliser des émulsions panchromatiques à grain fin et munir la source d'un filtre jaune, si possible éteignant le rouge extrême, ou mieux, opérer avec une lampe à sodium, ou une lampe à mercure avec un filtre ne laissant passer que les raies jaunes et vertes. On peut aussi utiliser une source blanche avec émulsion orthochromatique et un filtre jaune foncé arrêtant le bleu.

Nous attirons spécialement l'attention du lecteur sur le fait que de bonnes photographies microscopiques ne peuvent être obtenues que si le dispositif mécanique est parfaitement stable et exempt de vibrations. Se reporter, pour toutes les indications utiles, au premier chapitre.

Cas de l'observation microscopique par fluorescence. L'emploi d'une source ultraviolette est indispensable; il suffit que

toutes les pièces optiques interposées entre la source et l'objet soient transparentes à l'ultraviolet (par exemple, construites en quartz). C'est le cas de la lentille condensatrice de source, du miroir d'éclairage qui devra être constitué, non d'une lame de verre argentée sur la face arrière, mais d'une lame aluminée sur la face avant, du condenseur de statif et de la lamelle porte-objet. Le liquide d'immersion du condenseur pourra être de la glycérine ou, à défaut, de l'eau, transparente à l'ultraviolet. Par contre, toutes les pièces optiques derrière l'objet (lamelle, objectif et oculaire) seront les pièces en verre habituelles.

Optiques pour la microscopie ultraviolette. Ces optiques ne fournissent une bonne image que pour une radiation monochromatique indiquée par le constructeur (en général 0,2536 μ du mercure) et qui sera isolée au moyen d'un monochromateur. Suivre les indications en ce qui concerne les liquides d'immersion et les réglages.

Les seules combinaisons actuellement connues qui permettent d'obtenir une bonne image dans toute l'étendue de l'ultraviolet, sont les combinaisons quartz fluorine, ou quartz fluorure de lithium ou de sodium, mais elles ne sont pas applicables aux objectifs de microscopes. Les combinaisons comportant un miroir sphérique et une lame correctrice à face asphérique ou à deux lentilles à faces sphériques, permettent d'obtenir le même résultat. Ces combinaisons sont utilisées surtout dans les spectrographes.

Objectifs à miroirs. Ces objectifs présentent l'avantage considérable de pouvoir être utilisés, sans que leur qualité varie, pour toutes les radiations du domaine optique. On les construit en France sur les données de M. Nomarski, avec des ouvertures qui atteignent 0,60 à sec et 1 à immersion. Les objectifs à sec peuvent être utilisés pour n'importe quel intervalle spectral. Les objectifs à immersion nécessitent la traversée d'une matière réfringente, qui doit dont être choisie pour être transparente aux radiations que l'on veut étudier. Les objectifs à miroir possèdent de plus, à caractéristiques optiques égales, une distance frontale considérablement plus grande que celle des objectifs dioptriques.

Le contraste de phase et le contraste interférentiel sont de nouvelles techniques d'observation qui ont subi de tels développements au cours de ces dernières années que le cadre restreint dont nous disposons ne nous permet pas d'en parler utilement. Le lecteur se reportera à l'ouvrage suivant :

Le microscope à contraste de phase et le microscope interférentiel, par Maurice Françon. Editions du Centre National de la Recherche Scientifique 1954.

UTILISATION POUR L'ULTRA-VIOLET OU L'INFRA-ROUGE D'UN INSTRUMENT DIOPTRIQUE CORRIGÉ VISUELLEMENT

Les aberrations ne sont plus corrigées et les résultats obtenus dans ces conditions seront toujours médiocres, sinon franchement mauvais. Il y aura avantage, lorsque ce sera possible, à

opérer en lumière monochromatique. Dans certains cas, on pourra faire construire une lentille spécialement étudiée pour compenser l'aberration sphérique résiduelle.

Lorsqu'il s'agit d'objectifs astronomiques à 2 verres non collés, on améliorera le chromatisme du côté ultraviolet en séparant les deux lentilles par un intervalle d'air à déterminer par tâtonnements. Cet artifice ne convient pas pour l'infrarouge et, dans tous les cas, ne fournit pas la correction de l'aberration sphérique.

Ces artifices ne sont que des pis-aller et ne pourront donner des résultats équivalents à ceux d'une optique construite spécialement pour le domaine spectral ultraviolet ou infrarouge.

LES MONTAGES OPTIQUES EN LABORATOIRE

Nous croyons utile de rappeler que la qualité d'un instrument ou d'un montage optique dépend au moins autant de la stabilité et de la précision de son montage mécanique que de la perfection de l'optique. Le manque de stabilité de la mise au point par flexions ou dilatations, ou les vibrations des supports entrainent, pour un instrument visuel et surtout photographique, des défauts d'image ou des erreurs de pointés bien supérieurs à ceux qui proviennent des aberrations. On se rapportera, pour ce qui concerne ce sujet essentiel, au premier chapitre.

INSTRUMENTS AUXILIAIRES FONDAMENTAUX

1°- Collimateur.- Le collimateur se compose d'un objectif astronomique portant en son foyer objet un repère dont un des éléments bien défini coincide avec l'axe optique. Ce repère peut être, suivant les cas, un trou, une croisée de fils, une division, une mire ou un graticule quelconque, etc (fig. 19). Le collimateur remplit deux fonctions:

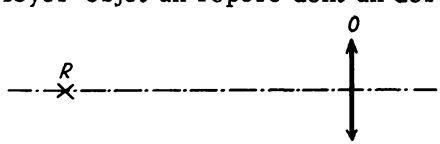


Fig. 19. - Principe du collimateur.

1° Il fournit de l'objet une image à l'infini. Cela est indispensable dans beaucoup de laboratoires où l'on ne peut disposer commodément d'un objet éloigné.

2° Il matérialise une direction dans l'espace, définie par la ligne joignant le centre optique de l'objectif au repère. Si ce dernier est suffisamment fin, et l'objectif dénué d'aberrations, cette direction est définie avec une très grande précision, qu'on peut évaluer au 1/5 de la limite de résolution de l'objectif, du moins si le montage mécanique possède la stabilité voulue. En prenant comme répère une division d'une échelle micrométrique, le collimateur définit une série de directions, qu'on détermine par un étalonnage préalable.

Réglage. - On vise, au moyen d'une lunette à réticule réglée sur l'infini, l'image du repère fournie par le collimateur, et on déplace le repère par rapport à l'objectif jusqu'à ce que cette image soit vue nettement et sans parallaxe sur le réticule de la lunette (voir au chapitre précédent le mode opératoire). Si l'on ne dispose pas d'une lunette, on transforme le collimateur en lunette en mettant au point l'image d'un point éloigné fournie par l'objectif du collimateur, sur le repère focal; on observe ce dernier au moyen d'un oculaire puissant, de grossissement tel que la lunette ainsi formée ait un anneau oculaire de l'ordre de 0,7 mm., ou, ce qui revient au même, un grossissement compris entre 1,3 et 1,6 fois le diamètre de l'objectif exprimé en millimètres. La distance minimum à laquelle doit être situé le point éloigné observé est donnée par la formule:

$$p = \frac{\Omega^2}{3\lambda}$$

ou, en lumière blanche :

$$p = \frac{\Omega}{0,0018}$$

p étant exprimé en millimètres :
Ω étant le diamètre de l'objectif en millimètres;

λ étant la longueur d'onde (distance de l'ordre de 5.000 mètres pour un objectif de 10 cm. de diamètre).

2 - Lunette à réticule. - Elle se compose d'un objectif, d'un réticule (souvent une croix) situé dans le plan focal de l'objectif et définissant l'axe optique et d'un oculaire (fig. 20).

La lunette a pour objet de repérer les directions, matérialisées par un point objet à l'infini. Associée à un cercle divisé permettant de mesurer ses rotations, elle est l'organe fondamental des instruments de mesure d'angles, goniomètre et théodolite.

Fig. 20. - Lunette à réticule.

Munie dans son plan focal d'un micromètre à vis, elle permet des mesures extrêmement précises de petits angles ou de petites variations d'angle. Avec les oculaires micrométriques à vis, dont la précision linéaire est de 0,005 mm., elle assure une précision de mesure de l'ordre du 1/5 de la limite de résolution, à condition que l'ouverture relative de l'objectif soit inférieure à f/5 et que le grossissement soit compris entre 1,3 et 1,6 fois le diamètre de l'objectif exprimé en millimètres.

Le réglage sur l'infini sera effectué soit en pointant l'image d'un collimateur ayant un diamètre d'objectif au moins égal à celui de la lunette, soit en pointant un objet situé à grande distance (vois les indications fournies pour le réglage du collimateur).

3°- Lunette autocollimatrice (fig. 21). - C'est une lunette dont le réticule est éclairé au moyen d'une source placée latéralement (par exemple, ampoule de lampe de poche), par l'intermédiaire d'une lame semi-transparente G, inclinée à 45° et

placée entre l'oculaire et le réticule. Ses propriétés sont les suivantes :

1° Elle peut être réglée sur l'infini sans le secours d'un point éloigné ou d'un collimateur. Si l'on dispose un miroir plan M, normalement à l'axe optique, on observe une image de retour R' du réticule par réflexion sur le miroir; la lunette est réglée exactement sur l'infini lorsque l'image de retour est située dans le même plan de front que le réticule.

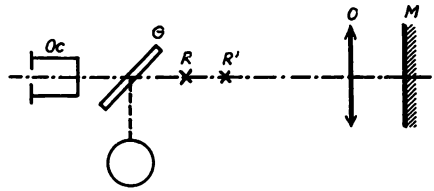


Fig. 21. - Lunette autocollimatrice.

2° Elle permet de régler une surface réfléchissante telle que M de manière à être normale à l'axe optique de la lunette. Cette dernière étant réglée pour l'infini, il suffit pour cela, en agissant sur l'orientation relative du plan et de la lunette, d'amener le réticule et son image à être rigoureusement superposés.

La précision de la mise à l'infini et du réglage de la perpendicularité à une surface, est, par suite de la réflexion, 2 fois meilleure que dans les pointés effectués sans autocollimation.

4°- Collimateur-lunette (fig. 22).- Dans la lunette autocollimatrice, le réticule et l'objet sont confondus : on les sépare dans le collimateur-lunette suivant le schéma de la figure. L'avantage du dispositif est de permettre de changer à volonté la forme de l'objet T (trou, fente, mire, croisée de fils, etc). De plus, aucune lame n'étant interposée entre l'oculaire et le réticule, on peut utiliser les oculaires les plus puissants, ou même l'oculaire micrométrique à vis, ce qui n'est pas possible pour le dispositif de la figure 21.

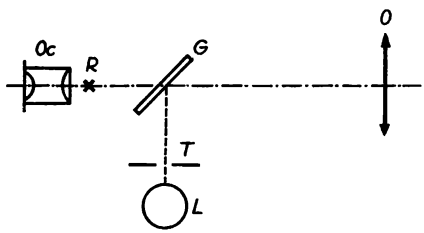


Fig. 22. - Collimateur lunette.

Oculaires auto-collimateurs.- L'ensemble du dispositif d'éclairage, du réticule et de l'oculaire, prend le nom d'oculaire autocollimateur.

Viseurs ou microscopes.- Ces instruments comprennent un objectif et un oculaire à réticule, mais dont le plan-objet est à distance finie; la coutume veut qu'on distingue sous le nom de viseurs ceux dont la distance frontale est supérieure à 50 mm., et de microscopes, les autres.

Viseurs dioptriques.- Les viseurs dioptriques comportent un coulissage gradué de la pièce qui porte le réticule et l'oculaire. Cette graduation est en général double :

a) En distances frontales : si l'on pointe un objet inaccessible (par exemple une image virtuelle), un index gravé sur le tube fournit directement la distance de l'objet à l'objectif.

b) En dioptries, inverses de la distance frontale exprimée en mètres; cette graduation à l'avantage d'être linéaire et de donner lieu, par conséquent, à des interpolations faciles, surtout lorsque l'objet est éloigné.

Le viseur dioptrique est très utile pour déterminer ou régler la position des images.

Viseurs ou microscopes autocollimateurs.- Ce sont des instruments analogues aux précédents, mais munis d'un oculaire autocollimateur. L'objectif donne alors une image réelle du réticule, située en avant de l'instrument, image qui sert d'objet pour de nombreuses applications (mesure des rayons de courbures, des distances focales et frontales par autocollimation, localisation des surfaces polies, etc...).

RÉGLAGE DU BANC OPTIQUE

Ce réglage comporte les opérations suivantes :

1° Amener les axes optiques des lentilles à être confondus entre eux et avec l'axe mécanique du montage.

2° Rendre l'objet (et éventuellement le plan de l'écran récepteur, écran diffusant ou plaque photographique) perpendiculaire à l'axe optique.

3° Placer les différents éléments du système aux distances calculées, par coulissage sur le banc, opération qui s'effectue sans changer les orientations des éléments ni la coïncidence des axes optiques.

L'ordre de ces opérations peut varier suivant les circonstances.

Les procédés que nous indiquons pourront sembler un peu compliqués et onéreux, faisant appel à l'un ou plusieurs des systèmes auxiliaires précédemment décrits; on ne perdra pas de vue que l'emploi de procédés systématiques conduisant à coup sûr au résultat le meilleur est beaucoup moins couteux que le temps perdu à tâtonner au hasard et à interpréter des résultats douteux.

1°- Réglage d'une lentille ou d'un objectif convergents, de manière que l'axe optique passe par un point donné et soit parallèle au coulissage du banc (fig. 23).

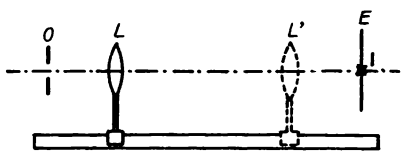


Fig. 23. - Réglage d'une lentille.

a) On matérialise le point pour un trou objet O, vivement éclairé. La lentille L est placée sur son support; on dégrossit le réglage à vue en l'approchant au maximum du trou sur lequel on la centre le mieux possible et en l'orientant au mieux. Il existe deux positions de la lentille, L et L', pour lesquelles l'image du trou I se forme nettement sur un écran E (ou un verre dépoli) placé à une distance de O supérieure à 4 fois la longueur focale. L'axe optique sera parallèle au coulissage du

banc lorsque, par déplacement de la lentille dans un plan de front, les images I correspondant aux deux positions seront confondues.

On peut avantageusement remplacer l'écran E par un microscope faible ou un viseur, ce qui simplifie les opérations.

Régler le viseur de manière à pointer l'objet O, puis le reculer. Introduire la lentille, la placer par rapport à O de manière qu'elle donne une image réelle, la déplacer dans un plan de front jusqu'à ce que cette image soit de nouveau centrée sur la croisée des fils du viseur (préalablement amené à la position longitudinale voulue).

b) Le réglage précédent a amené les lignes joignant l'objet et l'image aux points nodaux correspondants (axes secondaires) à être parallèles au banc, l'axe optique pouvant rester incliné, on le redressera par alignement des images réfléchies; en plaçant l'oeil nettement de dehors du plan de l'image, et regardant la lentille, on verra, d'une part, l'image très brillante (et plus ou moins floue) de O, d'autre part, au moins deux images très faibles dues aux réflexions multiples sur les surfaces des lentilles. On aligne ces images en changeant l'orientation de la lentille par rotation autour des axes convenables, pour deux positions de l'oeil situées dans deux plans méridiens perpendiculaires, au voisinage de l'axe optique.

Ces images sont souvent très difficiles à voir (impossible lorsque les surfaces sont traitées pour diminuer leur réflexion). On utilise alors le dispositif suivant, qui fait intervenir les images directement réfléchies par les surfaces, mais nécessite l'emploi d'un dispositif autocollimateur à objet et repère séparés.

L'opération a) ne change pas; l'objet est l'image du trou T, fournie par lame semi-transparente inclinée G, image en coïncidence optique avec le repère R (fig. 24).

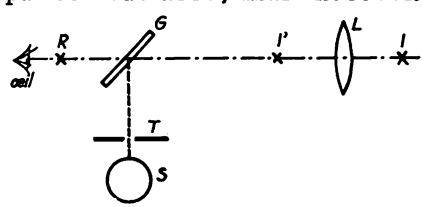


Fig. 24. - Réglage d'une lentille.

L'opération b) est effectuée en alignant, par l'oeil placé à une distance convenable, le repère R avec les images I et I' réfléchies par les surfaces de la lentille et vues à travers la lame.

On repassera alors au premier réglage, puis au second, et ainsi de suite jusqu'à ce que les deux réglages soient simultanément réalisés.

Il est alors facile de matérialiser l'axe optique, en cas de besoin, soit par la ligne joignant l'objet et son image, soit par deux pointés successifs au moyen du viseur.

2°. - Rendre l'axe optique d'une lunette ou d'un collimateur parallèle au coulissage d'un banc (fig. 25). Une lentille convergente L (de préférence un objectif astronomique) ayant été réglée comme indiqué ci-dessus, la déplacer de manière que l'objet O vienne à son foyer, puis pointer l'image à l'infini donnée par la

lentille au moyen de la lunette J, dont on rendra ainsi l'axe optique parallèle au banc. Pour régler un collimateur, on oriente une lunette comme il vient d'être dit; on enlève l'objet et la lentille, puis on oriente le collimateur de manière que l'image à l'infini de son repère focal coïncide avec la croisée des fils de la lunette, ce qui rend son axe optique parallèle au banc.

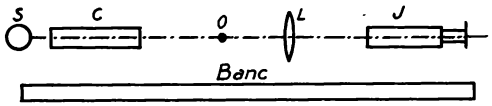


Fig. 25. - Réglage d'une lentille ou d'un système convergent.

Si l'on veut repérer une lunette collimateur, l'opération sera faite en une seule fois, en pointant l'image à l'infini de O donnée par la lentille L.

3°.- Rendre une surface plane perpendiculaire au coulissage d'un banc (fig. 26). Par la méthode ci-dessus, on règle l'axe optique d'une lunette autocollimatrice A parallèlement au banc. Il suffit alors, sans toucher à A, de régler l'orientation d'une surface plane polie M, de manière que l'autocollimation soit réalisée. Ceci permet deux applications :

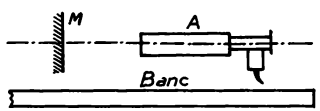


Fig. 26. - Réglage d'une surface plane perpendiculaire à un banc.

a) Dans le cas des systèmes optiques bien centrés dans leur barillet (objectifs photographiques, astronomiques, de microscopes ou oculaires vendus tout montés dans le commerce), on rendra l'axe optique parallèle au banc en les orientant de manière que l'autocollimation soit réalisée sur une lame plan-parallèle P, plaquée contre le barillet, en opérant au moyen d'une lunette autocollimatrice dont l'axe a été rendu parallèle au banc. Ce procédé, très précis, et commode, remplacera avantageusement l'alignement des images, seul possible s'il s'agit de lentilles simples. Si, en outre, on veut que l'axe optique passe par un point donné, on appliquera le réglage indiqué en 1° a), soit en déplaçant l'objectif dans un plan de front, soit en déplaçant le point objet.

b) Une lunette autocollimatrice parallèle au banc permettra de même de régler un objet plan perpendiculairement à l'axe optique. Si l'objet est réfléchissant (plaque de verre, règle divisée polie) on fait directement l'autocollimation sur lui. S'il n'est pas réfléchissant, on réalise l'autocolimation sur une lame plan-parallèle plaquée contre lui. Dans le cas d'une plaque photographique, on lui substitue dans le châssis une lame plan-parallèle de bonne qualité.

4°- Cas où le point objet est à l'infini. Le collimateur ayant été au préalable réglé parallèlement au banc, la position transversale de la lentille est indifférente, tant qu'elle est couverte par le faisceau issu du collimateur. Il ne restera donc plus que son réglage en orientation que l'on effectuera par l'une des deux méthodes indiquées.

5°.- Réglage d'une succession de systèmes optiques. a) Cas où l'orientation des lentilles est effectuée par alignement d'images.- Le point objet O et l'écran E ou le viseur C étant en place, on règle le système le plus éloigné de l'objet. On introduit le suivant et on le fait coulisser de manière que l'ensemble des deux systèmes donne une image réelle. Par déplacement latéral du 2° système, on fait coïncider cette image avec le repère tracé sur l'écran et correspondant au réglage correct du 1er système ou avec la croisée des fils du viseur. Puis on change son orientation de manière à obtenir l'alignement des images réfléchies et on recommence alternativement les deux réglages jusqu'à obtenir un résultat correct. On met ensuite en place de la même manière le 3° système, et ainsi de suite.

b) Cas où l'orientation des lentilles est effectué par autocollimation.- On procède comme ci-dessus après avoir installé à poste fixe une lunette autocollimatrice parallèle au coulissage, à une distance suffisante de l'objet.

On règle successivement l'orientation et la position latérale de chaque système, mais en commençant par le plus rapproché de l'objet.O.

c) Réglage des distances entre lentilles.- On opère en mesurant les positions des images par rapport aux lentilles, soit par un écran ou un viseur, soit au moyen d'un viseur dioptrique, si les images sont virtuelles et trop éloignées.

6°.- Lentilles divergentes. On peut opérer comme pour une lentille convergente, si on dispose d'un viseur de distance frontale assez grande pour atteindre l'image virtuelle. Sinon, on utilise une lentille convergente auxiliaire, assez puissante pour donner un système convergent lorsqu'elle est associée à la divergente. On règle la convergente seule, puis on lui associe la divergente de la manière indiquée au réglage d'une succession de lentilles, et enfin on élimine la convergente.

7°.- Contrôle rapide du réglage. Il est bon de vérifier qu'aucune grosse faute n'a été commise. On doit constater :

a) Que l'image sur l'axe optique est bien de révolution (à moins qu'un des éléments ne soit défectueux ou mal centré dans son barillet).

b) Que les pupilles sont centrées sur les lentilles. Pour cela, on place l'oeil dans l'image d'un point lumineux objet axial (pour un système visuel, enlever l'oculaire) et on vérifie que la partie illuminée des lentilles est un cercle centré sur leur contour extérieur. Un cercle lumineux excentré ou une pupille en oeil de chat (fig. 27) indiquent un défaut d'alignement des axes optiques.

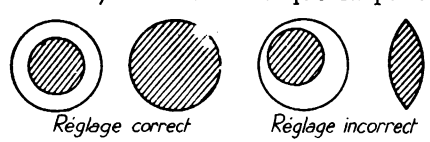


Fig. 27. - Contrôle rapide d'un réglage.

Remarque : On gagnera beaucoup de temps, au cours de ces diverses opérations, si les supports du banc sont munis de mou-

vements mécaniques de réglage, permettant au moins les translations transversales sans modifier l'orientation.

RÉGLAGE DE SYSTÈME SANS BANC OPTIQUE

Le procédé indiqué servira au réglage des montages sur table, mais pourra être utile également pour le réglage ou le contrôle des instruments complexes montés mécaniquement, bien qu'en général le réglage soit satisfaisant par construction, si les dessins et leur réalisation sont corrects.

On ne dispose plus, comme dans le cas du banc d'optique, de la faculté de pouvoir déplacer les lentilles et les remettre en position sans altérer le réglage. On procède alors ainsi :

a) On dispose les lentilles à vue le mieux possible, en réglant leurs distances à la valeur correcte.

b) On les aligne par déplacement dans un plan de front.

c) On règle leur inclinaison par rapport au faisceau.

Méthodes d'alignement des lentilles. On matérialise l'axe optique de l'appareil au moyen d'un faisceau lumineux obtenu comme suit (fig. 28).

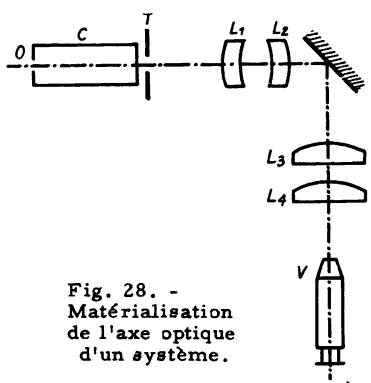


Fig. 28. - Matérialisation de l'axe optique d'un système.

Un collimateur C porte dans son plan focal objet un petit trou O, vivement éclairé. Contre son objectif, on place un diaphragme T portant lui-même un petit trou de quelques dixièmes de millimètres de diamètre. On obtient ainsi un pinceau lumineux étroit formant la ligne repère cherchée. Cette ligne est bien définie grâce à l'existence des anneaux de diffraction, à centres alternativement blancs et noirs, qui permettent de la repérer avec précision. Pour faciliter la recherche du pinceau étroit, on pourra donner au diaphragme la forme indiquée sur la figure 29, les parties hachurées étant des ouvertures. On déplacera successivement les lentilles L_1, L_2, etc., de manière que le pinceau lumineux soit bien centré par rapport à leur contour. On s'en assure, soit au moyen d'un petit écran recevant le pinceau, en mesurant la distance de la tache au contour des barillets, soit en plaçant une règle divisée sur verre à la sortie des lentilles et répétant la position de la tache sur les divisions au moyen d'une loupe, soit en vérifiant, au moyen d'une loupe, que la tache est bien centrée sur les diaphragmes métalliques.

Fig. 29. - Diaphragme T de la figure précédente.

Un autre procédé consiste à régler la position transversale des diverses lentilles de manière que leur introduction sur le

pinceau ne modifie pas sa direction, ce qui est facile à vérifier en pointant sa trace en dehors de l'appareil avec un viseur V ou une loupe à réticule bien stables. Ce procédé a l'avantage de s'appliquer même aux lentilles dont le contour extérieur n'est pas centré sur l'axe optique; mais il manque de précision pour les lentilles de très faible puissance.

Chaque lentille sera réglée complètement, en position et en orientation, avant de passer à la suivante. Il faudra donc, si on opère par alignement d'images, commencer par la lentille la plus éloignée du collimateur; si on opère par autocollimation, par la lentille la plus rapprochée.

L'usage du collimateur est commode parce qu'il existe à l'état d'ensemble rigide, mais non indispensable. Le pinceau lumineux peut être simplement produit par un point lumineux brillant placé à une distance suffisante d'un trou sans lentille collimatrice. Lorsqu'on utilise l'alignement des images, le diaphragme doit pouvoir être ôté et remis exactement à la même place pour chaque lentille.

Avant de procéder à la mise en place des lentilles, il faudra évidemment s'assurer avec le plus grand soin que la position et l'orientation du pinceau directeur correspondent bien à la position et à l'orientation de l'axe optique du système à régler. Cette mise en place doit être particulièrement soignée lorsque la direction des rayons doit être modifiée une ou plusieurs fois par des miroirs, de manière que le pinceau suive le trajet voulu, ce qui permettra au préalable, dans le cas où l'on contrôle un montage mécanique, de s'assurer de la position correcte des logements des barillets. Les miroirs seront mis en place les premiers, les lentilles ensuite, suivant la méthode décrite.

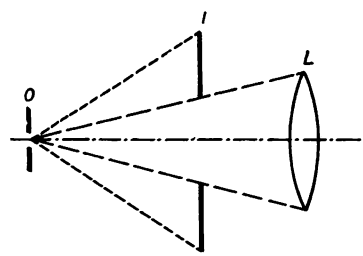


Fig. 30. - Alignement des lentilles.

Nous indiquons ici une variante du procédé d'alignement précédent, moins précise (fig. 30).

Elle consiste à placer, devant le collimateur ou le point objet, un diaphragme iris d'ouverture variable. L'axe du pinceau directeur est alors la ligne joignant le point lumineux au centre du diaphragme. On oriente le faisceau en fermant le plus possible le diaphragme. Puis on introduit les lentilles, dont on centre le contour par rapport au faisceau : on effectue cette opération en réglant dans chaque cas l'ouverture du diaphragme, de manière que la trace du faisceau ait le même diamètre que la lentille, ce qui permet d'apprécier au mieux leurs positions relatives. Pour les lentilles placées au voisinage des images, la trace du faisceau sera sensiblement ponctuelle; on opérera le centrage au moyen d'une règle divisée ou d'un diaphragme à trou centré, comme au paragraphe précédent.

RÉGLAGE D'UNE CHAMBRE PHOTOGRAPHIQUE OU D'UN DISPOSITIF DE PROJECTION A USAGE MÉTROLOGIQUE

Lorsqu'on doit effectuer des mesures par photographie ou projection, les tolérances de réglage sont d'autant plus sévères que la longueur à mesurer occupe une partie plus importante du champ. Nous indiquerons plus loin à quelles conditions doit satisfaire un instrument pour fournir des mesures correctes. Parmi celles-ci, le réglage de l'appareil est essentiel.

Il est sous-entendu que le montage mécanique des appareils doit être absolument stable, et qu'en particulier les plaques photographiques successives doivent reprendre rigoureusement la même position par rapport à l'objectif, sinon, les réglages indiqués seraient illusoires.

On vérifie que l'autocollimation, au moyen d'une lunette L, est simultanément réalisée par une lame plan-parallèle P_1 plaquée sur la collerette d'appui de l'objectif (ou sur le barillet avant de l'objectif) et sur une lame plan-parallèle P_2, placée dans le châssis à la place de la plaque (fig. 31); éventuellement, on agit sur l'orientation du porte-objectif ou du châssis pour établir la coincidence des autocollimations. De plus, si la chambre doit travailler à grande distance, l'image de la croisée des fils de la lunette formée par l'objectif sur la plaque P_2, lorsque le réglage est terminé, marquera exactement la trace de l'axe optique de l'objectif sur la plaque, trace qu'on pourra repérer photographiquement par rapport à des marques portées par le bord du châssis et venant s'imprimer sur les clichés. La connaissance de la position de l'axe sur la plaque est nécessaire pour les mesures de précision où l'on doit tenir compte de la distorsion de l'objectif.

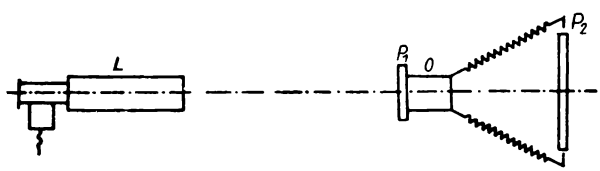


Fig. 31. - Réglage d'une chambre photographique.

Dans le cas où l'objet est situé à distance finie, il doit être dans un plan de front (sinon on devra corriger les résultats de l'inclinaison de l'objet, ce qui donnera lieu à un travail de dépouillement très pénible). Il suffira, pour effectuer le réglage, de faire une autocollimation supplémentaire sur une lame plan-parallèle plaquée contre l'objet, ou mise exactement à sa place.

Dans le cas où l'objet occupe un volume, les mesures ne sont plus possibles, à moins de connaître, dans chaque cas, la position de l'objet dans le sens parallèle à l'axe optique. Cependant, il est possible de s'affranchir de cet inconvénient en s'arrangeant pour que les axes des faisceaux provenant des divers points de l'objet soient tous parallèles à l'axe optique, suivant le montage de la figure 32. On place contre l'objet (par exemple, une particule A placée dans une cuve et une division B tracée sur les parois), une lentille dont le foyer image coïncide avec le trou circulaire

percé dans un diaphragme D : la chambre photographique est placée immédiatement derrière le trou. On peut ainsi, sans erreur de parallaxe, mesurer simultanément ou comparer entre elles deux longueurs situées dans des plans de front différents.

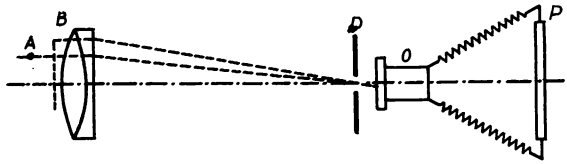


Fig. 32. - Montage pour ne recevoir que les rayons parallèles à l'axe optique.

DISPOSITIFS PARTICULIERS

Rendre deux lignes exactement perpendiculaires. On utilise pour cela une équerre optique (voir fig. 7, p. 206) dans laquelle la rayon émergent est toujours perpendiculaire au rayon incident, quel que soit l'angle d'incidence sur la face d'entrée. Dans les prismes bien construits, la déviation ne diffère de 90° que de quelques secondes d'arc au plus. Il est facile de matérialiser ces deux directions en prenant un faisceau incident issu d'un collimateur, et en repérant le faisceau émergent au moyen d'une lunette qui peut être autocollimatrice au besoin.

Dispositif matérialisant une ligne droite avec une grande précision (H. Cuny). Ce dispositif permet de réaliser un alignement ou de mesurer des écarts par rapport à une ligne droite, avec une précision qui peut atteindre le micron sur une longueur de plusieurs mètres, à la seule condition d'utiliser des objectifs d'ouverture suffisante.

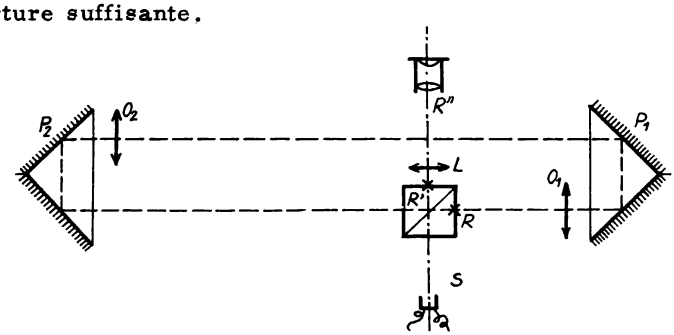


Fig. 33. - Matérialisation précise d'une ligne droite.

Un réticule R (fig. 33) est placé sur l'axe optique d'un système O afocal composé des deux objectifs convergents O_1 et O_2, par l'intermédiaire d'un cube de verre dont la face diagonale est argentée, la lampe d'éclairage étant en S. Le faisceau issu de O_1 est renvoyé parallèlement et en sens inverse au moyen du prisme rectangle à 2 réflexions P_1, puis tombe sur O_2, sur le prisme P_2 identique à P_1, et irait dans le prolongement de R O_1

former en R' une image de R, par réflexion sur la face argentée du cube G. Un objectif L forme de R' une image R sur un réticule mobile r, dont les déplacements sont mesurés par exemple au moyen d'une vis micrométrique. On montre facilement que l'image R reste au point sur r, quelle que soit la position du réticule objet entre les prismes P_1 et P_2. Par contre, si R est déplacé perpendiculairement à l'axe optique de O_1, son image R' est déplacée de la même quantité en sens inverse, ce qui permet, soit de mesurer la quantité dont R s'écarte de l'alignement, en mesurant au moyen de r, le déplacement de R, soit de déplacer R en le conservant constamment sur l'alignement. La précision est doublée par rapport aux dispositifs d'alignement direct.

Dans le "règle optique" de M. Cuny, la lampe, le cube, l'objectif, le micromètre et l'oculaire forment un bloc, muni, à sa partie inférieure, d'un palpeur mécanique que l'on place au contact de la pièce à étudier et dont les déplacements fournissent les écarts de forme avec la droite optique de référence; ce dispositif extrêmement précis peut recevoir bien d'autres applications, faciles à adapter à chaque cas particulier.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages fondamentaux

BOUTRY : l'Optique en 1941, Editions Revue d'Optique.
BRUHAT : Optique. Masson et Cie Editeurs.
DEVE : Le travail des verres d'optique de précision. Editions Revue d'optique :
FABRY et ARNULF : Vision dans les instruments. Editions Revue d'Optique.
Critical Tables. New York.
Tables annuelles de constantes. Paris.

Périodiques

Revue d'Optique, Paris.
Optica Acta, Paris.

SIXIÈME CHAPITRE

SOURCES DE LUMIÈRE ET FILTRES

par

G. DUPUY

Docteur ès-Sciences
Chef de travaux à l'École Supérieure de Physique et Chimie

SOURCES DE LUMIÈRE ET FILTRES

SOURCES DE LUMIÈRE

Généralités. 301
Lois du rayonnement des corps incandescents 304

SOLIDES INCANDESCENTS 306
Lampes à incandescence 306
Bec Auer 308
Lampe Nernst 309
Lampe Globar 311

DÉCHARGES DANS LES GAZ ET VAPEURS 312
Lampes Pointolites 314
Arc entre électrodes de charbon 315
Arcs entre électrodes métalliques 317
Lampe à arc dans le vide 318
Lampes à vapeur de mercure 318
Lampes à cathode chaude (Pirani) 323
Lampe à arc avec circulation de gaz rare 325
Lampe à décharge à haute tension et basse pression 327
Lampe à décharge à haute fréquence sans électrode 328
Tubes de Geissler 330
Lampes de Schuler 333
Lampes à lumière modulée 335
Sources ponctuelles 335

SPECTRES DE FLAMMES 336
Spectres excités par chocs électronique contrôlés 337

SOURCES DE LUMIÈRE BRÈVE DE GRANDE INTENSITÉ 339
Décharge instantanée dans un gaz 339
Explosions de fils 340

SPECTRES D'ÉTINCELLES 341
Généralités 341
Dispositifs divers 345
Etincelles sous l'eau 345
Etincelles dans le vide 346
Sources de Lyman 348

PROCÉDÉS TECHNIQUES 350

INTRODUCTION D'UN GAZ OU D'UNE VAPEUR DANS UN RÉCIPIENT PRÉALABLEMENT VIDE 350
Pompe de Toepler 350
Hydrogène 351
Gaz rares 352
Oxygène 353
Azote 353
Halogènes 355
Métaux alcalins 355
Autres métaux 359

SOUDURE ÉLECTRIQUE PAR POINTS 360

LES FILTRES 362

ABSORPTION DES RADIATIONS LUMINEUSES 362
Généralités 362
Transmission dans l'infrarouge 362
Transmission dans l'ultraviolet 364

LES FILTRES 367
Monochromateurs 367
Radiation de résonance 368
Filtre de Christiansen 369
Isolation focale 370
Rayons restants 371
Utilisation de milieux absorbants 374

SIXIÈME CHAPITRE

SOURCES DE LUMIÈRE ET FILTRES

SOURCES DE LUMIÈRE

GÉNÉRALITÉS.

Nous rappellerons succinctement quelques propriétés générales et données numériques qui interviennent dans l'établissement et l'utilisation des sources de lumière.

Fréquence, longueur d'onde, énergie des radiations.- Les différentes radiations sont caractérisées par leur fréquence.

La longueur d'onde λ est liée à la fréquence ν et à la vitesse de propagation c par l'égalité $\nu = c/\lambda$, ν est invariable pour une radiation donnée, mais dépend du milieu et la valeur indiquée généralement correspond au vide. On l'indique en μ (10^{-3} mm .) dans le domaine infra-rouge et en angströms (10^{-7} mm.) dans le domaine du visible et de l'ultra-violet.

Le nombre d'ondes ν' d'une raie est défini par $\nu' = 1/\lambda$ que l'on exprime en cm^{-1}, λ étant la longueur d'onde dans le vide. Le nombre d'ondes est proportionnel à la fréquence et à l'énergie $E = h\nu$ (h constante de Planck = $6,62.10^{-27}$ erg - sec.). Rappelons que l'émission des raies traduit le passage de l'atome d'un état stationnaire d'énergie à un autre, et l'habitude a été prise d'exprimer ces énergies en électron-volts.

Cette unité est l'énergie cinétique acquise par un électron, initialement immobile, après avoir été accéléré par une différence de potentiel de 1 volt; elle vaut $1,602.\ 10^{-12}$ ergs. La différence de potentiel nécessaire pour qu'un électron acquière une énergie équivalente à celle d'une raie de longueur d'onde λ est :

$$V\ (\text{volts}) = \frac{12.398}{\lambda\ (\text{angströms})}.$$

Spectres de raies. - Un spectre de raies se compose d'un ensemble de radiations monochromatiques distinctes dispersées tout le long du domaine spectral. Les spectres de raies sont produits par les atomes dans divers états d'excitation, le nombre des raies émises augmentant avec l'énergie d'activation.

C'est ainsi que les spectres de flammes sont moins riches que les spectres d'arc, eux-mêmes moins riches que les spectres

d'étincelles. Ces derniers sont du premier, du deuxième ordre, suivant qu'ils se rapportent à l'atome ayant perdu 1,2 électrons etc..., alors que les autres correspondent aux radiations émises par l'atome neutre plus ou moins excité.

Largeur des raies. - Plusieurs causes interviennent pour donner aux radiations qualifiées monochromatiques (en émission ou en absorption) une largeur finie dans l'échelle des longueurs d'onde. Le coefficient de finesse est défini par le rapport $\lambda/\Delta\lambda$ de la longueur d'onde moyenne à la largeur de la raie.

Une première cause d'élargissement provient du mouvement des molécules, suivant le principe de Döppler-Fizeau.

La théorie cinétique des gaz montre que la finesse d'une raie émise par des molécules de masse M à la température absolue T est proportionnelle à $\sqrt{\frac{T}{M}}$. La fréquence des chocs avec des molécules de gaz étranger, ou de même espèce, dépendant de la pression, provoque à la fois un déplacement du maximum d'intensité dans la largeur de la raie vers les grandes longueurs d'onde et une dissymétrie dans la répartition de l'intensité. L'effet de la pression est négligeable lorsqu'elle est inférieure à 10^{-2} mm. de mercure.

Lorsque les atomes qui participent aux chocs sont de même espèce, les forces d'échange qui prennent naissance augmentent notablement la largeur des raies, beaucoup plus qu'à la suite de collisions entre atomes d'espèce différente.

Ces deux causes d'élargissement interviennent plus ou moins au sein d'un gaz ou d'une vapeur contenant des ions et des électrons en mouvement.

L'examen, avec l'un des dispositifs interférentiels de Michelson, de Fabry et Pérot ou avec une lame de Lummer et Gehrcke, des raies, qui autrement paraissent uniques, révèle leur structure complexe (structure hyperfine); chaque raie est formée en général de plusieurs raies composantes, mais, dans la plupart des cas, on peut considérer simplement les raies comme monochromatiques. Rappelons, à ce propos, l'effet Stark (décomposition d'une raie au moyen d'un champ électrique intense) et l'effet Zeeman (champ magnétique).

Les conditions les plus favorables à l'obtention des raies fines sont donc : température basse, faible pression et si le choix du corps émetteur est possible, gaz ou vapeur de masse atomique élevée. Il convient d'opérer également avec des champs électriques faibles, la diminution de l'intensité ionique qui en résulte agissant favorablement à son tour, par la réduction des actions interatomiques, sur la largeur des raies.

Spectres de bandes et spectres continus. - Les molécules à l'état de gaz ou de vapeur donnent des spectres complexes. On voit apparaître des raies, dues aux atomes provenant de la dissociation de la molécule dans le cas d'excitations énergiques, des bandes et quelquefois un fond continu caractéristique de la molécule.

La lumière absorbée ou émise étudiée avec un appareil peu dispersif occupe une suite de régions restreintes, plus ou moins larges, du domaine spectral, appelées bandes. L'intensité est variable le long de ces bandes, elle s'annule en général brusquement à une extrémité, appelée tête de la bande, alors qu'à l'autre extrémité, la diminution s'effectue graduellement. Il arrive que les bandes présentent un aspect diffus ou sont visiblement constituées d'un nombre considérable de raies. Les spectrographes à grand pouvoir de résolution mettent en évidence les groupes de raies qui les constituent. L'écart de ces raies varie de façon linéaire (loi de Deslandres) : il augmente lorsqu'on s'éloigne de la tête de bande et, en même temps, l'intensité des raies diminue.

Il apparaît encore des régions étendues, larges bandes dans lesquelles on ne peut déceler aucune structure et qui sont de véritables spectres continus. Ils sont l'indice d'une stabilité très faible de l'édifice moléculaire ou de sa dissociation.

Les spectres dont il vient d'être question concernent les gaz et les vapeurs. Les corps solides ou liquides chauffés émettent également des spectres continus dont les propriétés dépendent surtout de la température.

Absorption des radiations par les gaz et les vapeurs. - Un atome, pris dans l'état fondamental ou dans l'un des états correspondant aux divers ordres d'ionisation, ne peut absorber en général que les radiations qu'il est susceptible d'émettre dans l'état considéré. S'il est dans l'état fondamental, les radiations qu'il peut absorber sont appelées radiations de résonance.

Absorption cumulative. - Dans la durée très courte de sa vie (10^{-7} à 10^{-8} sec. en général), un atome activé peut passer à un état d'énergie supérieure par absorption de certaines radiations de son spectre, puis, dans ce nouvel état, par le même mécanisme, atteindre un niveau encore plus élevé.

Dans tous les cas, les radiations absorbées sont celles qui, dans le schéma de niveaux énergétiques de l'atome, correspondent à des transitions ayant le niveau considéré comme niveau de départ. Après ces absorptions successives, les possibilités de retour vers l'état fondamental, par émission spontanée, comportent, en plus du chemin inverse à celui suivi dans le processus d'absorption, des voies différentes. Par suite, la lumière réémise n'a pas forcément la même composition que la lumière absorbée; de plus, plusieurs atomes, bien que de même espèce et pris dans le même état d'activation, pourront emprunter des chemins différents pour revenir à l'état fondamental.

La probabilité des absorptions successives est très petite en général, en raison de la faible concentration des atomes activés et de la brièveté de leur existence. Le nombre des absorptions cumulatives ne dépasse jamais 3 de toutes façons.

Toutefois, les radiations de résonance jouent un rôle privilégié dans l'absorption cumulative, car les atomes dans l'état fondamental sont toujours extrêmement nombreux, si bien que l'énergie d'excitation d'un niveau de résonance se transmet d'un atome à l'autre, augmentant ainsi la probabilité d'une deuxième absorption.

Etats métastables. - Il en est de même des états métastables, dont la durée de vie est relativement grande (de l'ordre de 10^{-2} sec.) Ce sont des états dont la probabilité de retour à un état d'énergie inférieure par émission spontanée est très faible; les atomes métastables perdent leur énergie par transfert direct au moment d'un choc avec les autres atomes ou les parois.

Ces phénomènes d'absorption cumulative sont importants pour la construction des sources de lumière. Ils se produisent au sein du gaz émetteur; il est parfois utile de les favoriser pour enrichir le spectre d'émission en radiations situées dans un domaine déterminé et modifier la répartition de l'intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde. Il suffit, pour cela, d'augmenter le nombre des atomes activés, en faisant croître l'intensité du facteur d'excitation et la pression du gaz ou de la vapeur.

Le spectre d'absorption des molécules est un spectre de bandes résolubles en raies et qui est identique aux spectres de bandes observés à l'émission.

Transferts d'énergie. - L'excitation d'un atome peut se produire par choc avec un électron, à condition que ce dernier ait une énergie cinétique correspondant au moins à l'un des niveaux de l'atome (chocs de première espèce).

L'excitation peut se produire également par choc entre un atome activé et une particule, atome ou molécule d'espèce différente, par simple transfert (chocs de deuxième espèce), l'excédent d'énergie se retrouvant sous forme d'énergie cinétique. La probabilité d'échange dépend de la distance du niveau d'excitation de l'atome au niveau le plus voisin de la particule. Elle est d'autant plus grande que l'écart est plus faible.

Ces phénomènes de transfert de seconde espèce sont utilisés dans nombre de sources lumineuses dont la luminescence est obtenue par le passage d'un courant électrique dans un mélange de gaz rares et de vapeurs métalliques.

LOIS DU RAYONNEMENT DES CORPS INCANDESCENTS

Les liquides et solides portés à une température élevée émettent des radiations formant un spectre continu qui ne sont qu'approximativement régies par les lois du rayonnement du "corps noir". Celui-ci est caractérisé par le fait qu'il absorbe toutes les radiations qu'il reçoit, quelle que soit leur longueur d'onde, alors que tous les corps réels émettent ou absorbent sélectivement certaines fréquences ou bandes de fréquence.

Loi de Kirchhoff. - A une température donnée, pour chaque longueur d'onde et pour une même inclinaison des rayons, la brillance spectrale énergétique d'un corps quelconque est égale au produit de son facteur d'absorption par la brillance spectrale énergétique du corps noir à la même température.

Comme la brillance d'un corps quelconque est toujours plus petite que celle du corps noir pris à la même température, on est

amené à définir une température de brillance; c'est celle qu'aurait le corps noir émettant avec la même intensité que le corps utilisé, une radiation de longueur d'onde définie.

Loi de Stephan. - L'énergie totale rayonnée chaque seconde par un centimètre carré du corps noir est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue :

$$R = \sigma . T^4 \qquad \sigma = 5,73 . 10^{-5} \text{ ergs/cm}^2/\text{degré}^{-4}$$

Il faut remarquer que l'échauffement d'un corps noir de surface unité recevant les radiations précédentes et placé dans une enceinte à la température T_o est produit seulement par l'énergie : $W = \sigma (T^4 - T_o^4)$.

Lois de Wien. - Le produit de la longueur d'onde correspondant au maximum de brillance spectrale énergétique du corps noir par sa température absolue est constant :

$$\lambda_m T = 0,2884 \text{ C.G.S.}$$

Le maximum de la brillance spectrale énergétique du corps noir est proportionnel à la cinquième puissance de la température absolue :

$$\frac{E_m}{T^5} = 4,162 . 10^5$$

Loi de Planck. - La brillance spectrale énergétique du corps noir à la température absolue T est pour la longueur d'onde λ:

$$E_\lambda = C_1 . \lambda^{-5} \left(e^{\frac{-C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}$$

dans cette formule : $C_1 = 1,185 . 10^{-5}$ CGS

$C_2 = 1,432$. C.G.S.

(e = base des logarithmes népériens).

Cas particuliers - 1° lorsque le produit λT est inférieur à 2.500, c'est-à-dire lorsqu'on étudie le visible et l'ultra-violet émis par un corps noir dont la température n'excède pas 3.500° K, l'unité est négligeable devant l'exponentielle, on utilisera la formule de Wien :

$$E_\lambda = C_1 \lambda^{-5} \quad e^{\frac{-C_2}{\lambda T}}$$

elle ne convient pas pour l'infra-rouge.

2° Lorsque le produit λT est supérieur à 2.500, on simplifie la formule en développant en série $e^{-C_2/\lambda T}$ et en se limitant aux 2 premiers termes.

L'expression obtenue $E = \frac{C_1}{C_2} \lambda^{-4} T$ convient pour l'infra-rouge, c'est la formule de Rayleigh.

Les sources de lumière utilisant des solides incandescents

sont les plus simples, aussi les décrirons-nous en premier lieu, pour continuer par les sources utilisant des vapeurs ou des gaz.

SOLIDES INCANDESCENTS

LAMPES A INCANDESCENCE

On utilise en général le tungstène dont le point de fusion est très élevé (3.600°). Il rayonne, comme tous les corps solides, de façon sélective, c'est-à-dire que l'énergie émise n'est pas, pour toutes les longueurs d'onde, celle que donnerait le corps noir à la même température.

L'efficacité lumineuse est une fonction très rapidement croissante de la température; il en est de même de la vitesse d'évaporation du métal. La durée de vie du filament est, par suite, très abrégée aux températures élevées; par exemple, aux températures absolues de 2.025 et 2.325°, les durées de vie sont dans le rapport de 1.500 à 1 environ. Une augmentation de 1% de la tension d'un filament à 2.300°K diminue la durée de vie de 14% et augmente la brillance de 3,6%. Habituellement, on survolte de 10% environ une lampe qu'on veut pousser.

La vapeur métallique, dans les lampes vidées, se condense sur les parois qui noircissent lentement, perdant peu à peu leur transparence initiale.

On sait que la vitesse d'évaporation est fortement diminuée lorsque le filament est chauffé en atmosphère gazeuse inerte, agissant par conductibilité calorifique; celle-ci varie en sens inverse de la masse atomique, ce qui explique le choix de gaz rares lourds (krypton, xénon). Il convient donc de choisir ce genre de lampes qui permettent de porter le métal à température plus élevée sans abréger sa vie. La brillance devient facilement 5 fois plus grande (1.000 bougies par cm2 environ vers 2.600°). D'autre part, les courants gazeux ascendants localisent la condensation de la vapeur métallique dans le col de l'ampoule, que l'on a avantage, pour cette raison, à faire assez long.

Il est important, au cours de mesures photométriques par exemple, de ne pas changer la position de la lampe par rapport à son support, afin de ne pas modifier la circulation gazeuse dans l'ampoule, ce qui risquerait de produire une nouvelle répartition de la température le long du filament.

A ces courants de convection correspondent des pertes de chaleur relativement très élevées pour les filaments minces. Les lampes à faible puissance sont donc désavantagées. On réduit ces pertes en enroulant le filament suivant une hélice à pas très serré; elle devient, à ce point de vue, équivalente à un conducteur plein de même diamètre et de même longueur.

La distribution spectrale d'énergie du tungstène s'obtient à partir de celle du corps noir. Pour chaque température, la répartition spectrale énergétique relative dans le domaine visible est

très approximativement la même que celle du corps noir à une température différente appelée température de couleur du métal. Cette correspondance étant connue entre la température vraie et la température de couleur, le calcul de la répartition d'énergie dans le spectre visible est très simplifié.

La transmission lumineuse de la paroi de l'ampoule intervient, la transparence du verre étant limitée vers 3.500 Å dans l'ultra-violet et vers 2,5 μ dans l'infra-rouge.

Une paroi de quartz permet d'étendre beaucoup la transmission vers l'ultra-violet. Aussi rapporte-t-on parfois des fenêtres à faces planes et parallèles. On en établit au besoin, avant scellement, la courbe de transmission.

L'ampoule a, quand on veut effectuer des mesures de précision, une forme en cornue pour que le lumière provenant du tungstène incandescent ne soit pas réfléchie par la paroi dans la direction de la fenêtre de sortie.

Pour les mesures d'intensité lumineuse, le filament utilisé est le plus souvent sous forme de ruban. Ses extrémités, soudées aux conducteurs qui lui servent de support et le relient à la source de courant, ont une température inférieure à la portion centrale; en repliant le ruban comme l'indique la figure 1, on utilisera seulement la partie où la température, et par suite la brillance, sont uniformes.

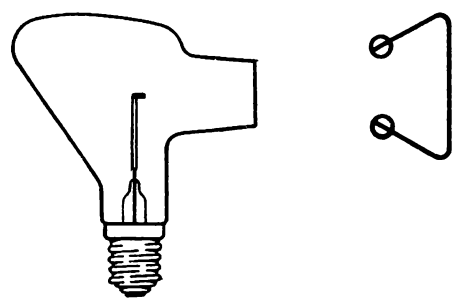


Fig. 1. - Lampe à ruban de tungstène.

On trouve dans le commerce des lampes de ce genre; elles sont vendues avec leur graphique d'étalonnage qui donne, en valeurs relatives ou absolues, la distribution spectrale énergétique.

Relation entre la température de couleur et la température vraie du tungstène (absolues) :

Température vraie	Température de couleur
1.000	1.006
1.400	1.414
1.800	1.825
2.000	2.033
2.200	2.242
2.400	2.452
2.600	2.663
2.800	2.878
3.000	3.094
3.200	3.311

Dans le tableau suivant, on trouvera la fraction de l'énergie émise par une lampe à filament de tungstène porté à température déterminée dans diverses régions spectrales.

	Températ. de couleur °K	Longueurs d'onde			
		2800-3100	3000-4000	4000-7600	au-dessus de 7600
Fraction de l'énergie émise	2.670	0,0000290	0,000850	0,090	0,909
	2.740	0,0000410	0,001100	0,099	0,900
	2.810	0,0000570	0,001410	0,109	0,889
	2.920	0,0000890	0,001980	0,120	0,878
	2.980	0,0001160	0,002390	0,133	0,865
	3.300	0,0003530	0,005480	0,182	0,812

BEC AUER

Le manchon Auer, constitué par un tissu incombustible servant de support à un mélange d'oxydes de thorium et de cérium (99% de ThO_2, 1% de CeO_2 en général) est utilisé au laboratoire surtout comme source de radiations calorifiques. Le manchon, placé dans la flamme d'un bec Bunsen, a un pouvoir émissif toujours inférieur à celui du corps noir, quels que soient la température et le domaine spectral.

Dans les conditions habituelles de fonctionnement, la température du manchon est voisine de 1.525°. L'oxyde de thorium seul est très transparent pour toutes les radiations, sauf pour l'infra-rouge à partir de 10 µ; son pouvoir émissif est par suite peu différent de celui du corps noir dans les mêmes conditions au delà de 10 µ. Le pouvoir émissif du mélange des oxydes est donc bon pour les grandes longueurs d'onde.

Une augmentation de la teneur en cérium amènerait un accroissement du pouvoir émissif dans l'infra-rouge lointain.

Au spectre d'émission du manchon se superposent les radiations caractéristiques de la flamme du gaz d'éclairage qui font apparaître, entre autres, 2 maxima très nets : l'un à 2,75 µ dû à la vapeur d'eau, l'autre à 4,35 µ, très intense et pouvant servir de repère, donnés par le gaz carbonique. Ce n'est qu'à partir de 7 µ environ que l'émission du manchon devient importante : vers 15 µ, l'émission diffère peu de celle du corps noir.

La méthode d'isolation focale a permis d'obtenir avec une telle source des radiations presque monochromatiques dans l'infra-rouge lointain au delà de 100 µ.

Il est facile d'augmenter l'énergie lumineuse émise en élevant le plus possible la température du manchon (point de fusion du mélange d'oxydes 2.800°). On pourra effectuer pour cela un préchauffage du mélange de gaz et d'air en faisant circuler les gaz chauds provenant de la combustion autour du tube d'alimentation du bec.

Il est commode d'utiliser un ruban découpé dans un manchon ordinaire. Il est maintenu, au moyen d'un cadre métallique, contre un carton d'amiante percé d'une ouverture; le ruban est chauffé obliquement au moyen d'une petite flamme de gaz (fig.2). La surface utile du ruban à quelques millimètres de largeur et 2 à 3 centimètres de hauteur; elle est donc très maniable optiquement.

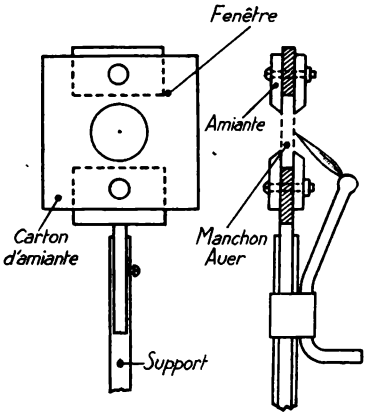


Fig. 2. - Dispositif de chauffage d'un manchon Auer.

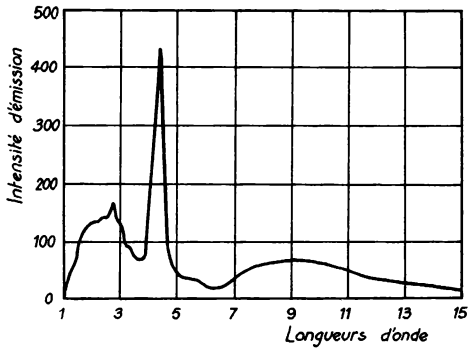


Fig. 3. - Courbe d'émission de manchon Auer.

Pfund préconise de chauffer des rubans de manchon Auer au moyen d'une décharge électrique éclatant entre deux fils de platine reliés au secondaire d'un transformateur donnant 10.000 volts. Entre 0,7 et 15 μ, si on utilise en plus une flamme pour augmenter encore la température, l'émission est analogue à celle d'une lampe Nernst. Entre 15 μ et 150 μ, le chauffage par le gaz suffit.

LAMPE NERNST

La lampe Nernst est d'un emploi très commode. Son émission intense est remarquablement constante, mais limitée dans l'infrarouge à 15 μ environ. La figure 4 représente la distribution énergétique en fonction de la longueur d'onde; la répartition est sélective et dépend naturellement de la température.

La lampe est constituée par un filament obtenu à partir d'un mélange d'oxydes métalliques (généralement d'oxydes de terres rares). Il est porté à l'incandescence à l'air par un courant électrique. La conductibilité électrique du filament, nulle dans les conditions normales, augmente très rapidement avec la température. A partir de 1.000°, il devient capable d'absorber suffisamment d'énergie électrique pour élever sa température au voisinage de 2.000°, sans qu'il y ait apparition de produits de combustion, comme avec d'autres sources, venant recouvrir ou même attaquer les surfaces optiques d'un appareil voisin.

Ces filaments peuvent être confectionnés comme suit :

On prépare une pâte épaisse à partir d'un mélange contenant

80% d'oxyde de zirconium, 10% de thorine ThO_2, 5% de chaux, 5% de magnésie et des traces d'anhydride borique.

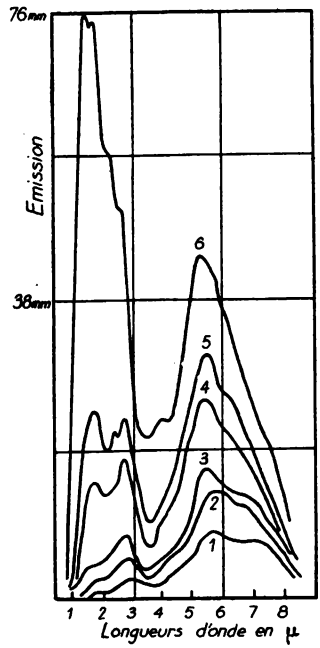


Fig. 4. - Courbes d'émission de la lampe Nernst.

1 : 2 watts	4 : 6,2 watts
2 : 3 "	5 : 7,1 "
3 : 4,2"	6 : 10,6 "

Les oxydes, pulvérisés finement, sont malaxés avec une solution de sucre, ou avec de la glycérine, dans un mortier d'agate. La pâte est amenée à passer dans une filière de 1,3 mm. de diamètre, par compression au moyen d'un piston se déplaçant dans un cylindre de 3 mm. de diamètre.

Les filaments sont placés sur une tôle enduite de magnésie et séchés lentement jusqu'au moment où la matière organique charbonne. On les coupe en morceaux de 3 cm. de longueur qui sont durcis par un fort chauffage dans un petit arc à charbon.

Il reste à fixer les fils de platine qui permettront de réunir le filament, soit à une batterie d'accumulateurs, soit au secteur alternatif.

En courant continu, l'électrode négative est un fil de platine de 0,1 mm. de diamètre dont on entoure le bâtonnet et qu'on scelle en mouillant avec une solution de nitrate de thorium et recouvrant de la pâte des oxydes diluée par la solution précédente. On laisse sécher lentement à l'air jusqu'à durcissement.

On ne peut opérer de même pour fixer un fil de platine à l'extrêmité positive, car pendant le fonctionnement, il y a dégagement d'oxygène qui rompt par places le contact de la pâte et du fil, des arcs s'amorcent qui détruisent le scellement.

On entortille un faisceau de 5 ou 6 fils de platine (0,1 mm. de diamètre). Les extrémités des fils, à un bout du faisceau, sont repliées à angle droit vers l'intérieur de façon à former une griffe, dans laquelle on introduit le filament. On recouvre le contact mouillé par une solution de nitrate de thorium, d'une pâte contenant en parties égales les oxydes d'yttrium, de thorium, de cérium, de zirconium. On chauffe fortement après séchage à l'air.

En service, pour éviter la rupture du bâtonnet par suite de sa dilatation, on ne doit pas le fixer rigidement aux extrémités.

Dans le cas d'une alimentation par le secteur alternatif, les deux extrémités seront scellées comme si on avait 2 pôles positifs.

La résistance du filament de la lampe Nernst diminue quand l'intensité du courant qui le traverse augmente. Afin de stabiliser le fonctionnement, on place, en série avec le bâtonnet, une résistance constituée par 2 lampes de 60 watts à filament de tungstène

(220 volts) montées en parallèle ou mieux une lampe fer-hydrogène. Le courant normal dans le bâtonnet est de l'ordre de 0,25 ampères.

Pour rendre le filament assez conducteur, il faut le chauffer au rouge, par un courant intense traversant une spirale ou une grille placée autour de lui. Il est commode de supprimer automatiquement le courant auxiliaire de chauffage par l'action d'un électro-aimant parcouru par le courant qui traverse le bâtonnet. (fig.5).

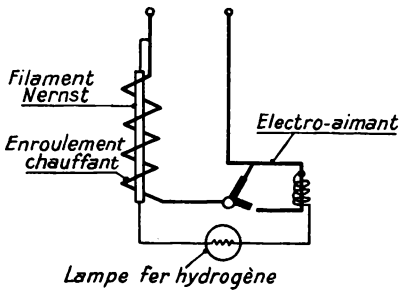


Fig. 5. - Circuit électrique de chauffage.

LAMPE GLOBAR

C'est encore une source utile pour les études dans l'infra-rouge.

On utilise, comme dans la lampe Nernst, l'émission sélective des oxydes de terres rares dans ce domaine. Les oxydes sont répartis sur un conducteur en carbure de silicium qu'ils protègent de l'oxydation. La tige de carborundum, diamètre 8 mm., longueur 25 cm., est portée facilement à haute température jusqu'à 2.000° par un courant électrique. Elle est contenue dans un cylindre de laiton refroidi par contact avec un serpentin de cuivre parcouru par un courant d'eau.

Les radiations émises sortent par une ouverture percée dans le cylindre de laiton. L'avantage de cette source résulte de sa facilité d'emploi et de la constance de son émission. Elle est facile à construire au laboratoire en utilisant le mélange d'oxydes indiqué à propos de la lampe Nernst, le point délicat est la fixation aux extrémités de la tige des pièces métalliques d'amenée de courant.

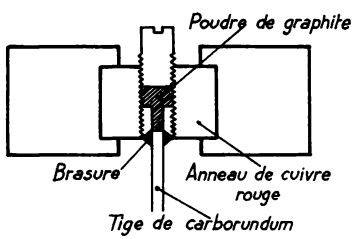


Fig. 6. - Amenée de courant sur tige de carborundum.

Les extrémités sont brasées à l'argent à des anneaux de cuivre rouge, qui, à leur tour, peuvent être vissés dans des anneaux également en cuivre rouge, filetés intérieurement. Une vis comprime de la poudre de graphite contre l'électrode (fig. 6). L'ensemble peut être refroidi par circulation d'eau ou comporter des ailettes.

Un autre montage est le suivant :

La source est une baguette de charbon d'arc qui est chauffée dans le vide par un courant électrique comme la source Globar.

Elle est usée au centre avec une meule émeri; cette portion de faible longueur, 3 cm. environ, est donc portée à température beaucoup plus élevée que le reste de la tige et peut atteindre facilement 2.000°. Le reste du montage est sensiblement le même que précédemment.

L'émission est à peu près la même que celle du Globar entre 1 μ et 10 μ, mais très supérieure au-delà en raison de l'absence de gaz carbonique. Pour utiliser au mieux l'infra-rouge, on peut avantageusement se servir d'une fenêtre de bromure de potassium.

DÉCHARGES DANS LES GAZ ET VAPEURS

Généralités. - La tension qu'il est nécessaire d'appliquer entre 2 électrodes métalliques plongées dans un gaz pour provoquer le passage du courant obéit à la loi de Paschen; la courbe a l'allure de celle de la figure 7 qui se rapporte à l'argon entre électrodes planes et parallèles.

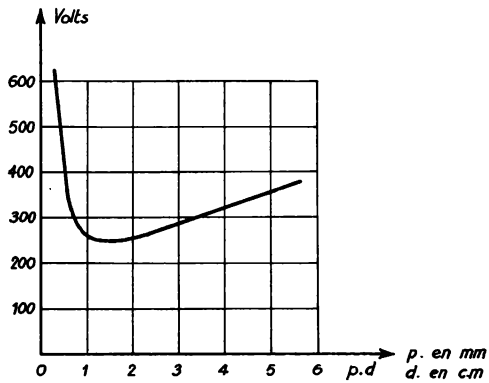


Fig. 7. - Courbe de Paschen.

Le potentiel explosif monte très vite aux basses pressions lorsque l'écart entre les électrodes est de l'ordre de grandeur du libre parcours moyen des électrons, car l'ionisation du gaz par chocs électroniques se produit plus rarement.

La nature de la cathode, la forme des électrodes, le diamètre du tube dans lequel a lieu la décharge, les impuretés contenues dans le gaz, modifient beaucoup la valeur du potentiel explosif.

L'aspect de la décharge est classique; du point de vue des sources de lumière, la colonne positive présente une grande importance en spectroscopie. Elle est d'autant plus courte que le vide est plus élevé et les électrodes plus voisines. La lumière cathodique peut, au contraire, se prolonger jusqu'à l'anode lorsque le régime d'arc s'amorce dans le tube à décharge. Ce régime prend naissance dès que la cathode est portée à température suffisante pour que son émission thermionique soit importante, les électrons émis par cette électrode ionisant par chocs le gaz ou la vapeur.

La chute de potentiel, faible au voisinage de l'anode (environ 20 volts) est presque entièrement localisée aux environs de la cathode où, suivant la nature des électrodes et du gaz, elle est comprise entre 200 et 400 volts. On peut la diminuer en utilisant

comme cathodes des métaux alcalins ou des alliages de métaux alcalins avec du cadmium et du thallium, ou mieux encore en utilisant des cathodes chaudes recouvertes d'oxydes alcalino-terreux.

Caractéristiques de la décharge. - On peut tracer, en montant une résistance en série avec un tube à gaz, sa courbe caractéristique courant-tension (fig. 8). Le tube s'illumine pour une valeur déterminée de la tension dite tension d'amorçage. En augmentant le courant, la tension baisse rapidement (régime instable) puis reste constante et augmente ensuite proportionnellement au courant (décharge anormale). Dans cette phase, la puissance électrique absorbée fait croître la température de la cathode jusqu'à l'émission d'électrons thermiques qui correspond au régime d'arc, caractérisé par une chute rapide de la tension, ou une augmentation rapide du courant pouvant amener la destruction de la cathode.

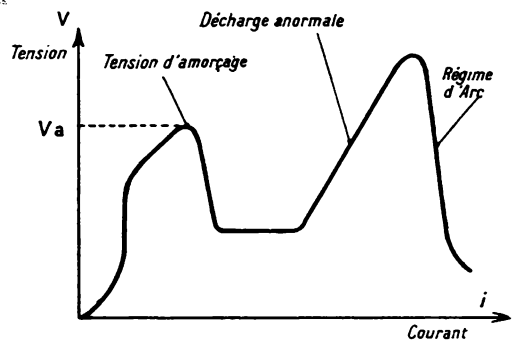


Fig. 8, - Courbe caractéristique de la décharge.

L'aspect du tube se modifie en même temps : la lueur négative recouvre à l'amorçage une partie de la cathode, puis s'étend pour la recouvrir entièrement : à ce moment commence la décharge anormale et la brillance est alors porportionnelle au courant.

Lorsqu'on abaisse la tension pour éteindre le tube, on constate que la tension d'extinction est toujours inférieure à la tension d'amorçage.

Lueur négative. - Au voisinage de la cathode, les électrons fortement accélérés par le champ intense qui y règne peuvent, par des chocs, amener les atomes ou les molécules du gaz sur des niveaux très élevés d'excitation. La lueur négative se compose des radiations des spectres d'étincelles des divers ordres.

L'observation de cette lueur négative se fait commodément, en opérant à basse pression pour faire disparaître la colonne positive, la cathode étant un tube (tube à cathode creuse de Schüler).

A plus haute pression, celle-ci est réglée pour que la lueur négative soit limitée au volume intérieur à l'électrode.

Une autre propriété importante de la lueur cathodique résulte du fait que la brillance, dans certaines conditions, est propor-

tionnelle au courant de décharge; de plus, l'intensité lumineuse suit avec un retard très faible, environ 10^{-5} seconde, le courant qui lui a donné naissance.

LAMPES POINTOLITES

Ce sont des sources lumineuses sensiblement ponctuelles et de très grande brillance (jusqu'à 9.000 bougies/cm^2) utilisant la décharge par arc entre deux électrodes de tungstène placées dans un gaz inerte. Elles présentent, par rapport à l'arc au charbon, plusieurs avantages, essentiellement la constance de l'intensité lumineuse au cours du temps et l'absence de réglage pour compenser l'usure des électrodes.

La pression du gaz inerte est assez élevée (75 à 100 mm.) pour faciliter l'amorçage de l'arc. C'est qu'en effet, d'une part, l'énergie dépensée dans la décharge se trouve presque entièrement localisée vers la cathode et, d'autre part, l'épaisseur de l'espace cathodique varie en sens inverse de la pression. Ces deux circonstances favorisent donc l'échauffement de la cathode.

La tension aux bornes de l'arc est de 50 à 60 volts. Une résistance montée en série limite le courant et stabilise le fonctionnement. On fabrique de telles lampes jusqu'à 1.000 bougies.

Ces lampes peuvent être alimentées en courant continu ou en courant alternatif, mais leur construction n'est pas tout à fait identique dans les deux cas.

Pour l'alimentation en continu, la cathode est une sphère et l'anode une plaque ou même une sphère. En fonctionnement, la cathode sphérique portée à très haute température (2.800° et même 3.000° si l'on consent à en écourter la vie) émet les électrons nécessaires à l'entretien du régime d'arc. L'amorçage de l'arc se fait de différentes façons. On utilise parfois un filament auxiliaire émetteur chauffé à l'incandescence; il tient lieu de cathode et on crée une décharge entre celui-ci et la sphère précédente (qui sert momentanément d'anode). Lorsqu'elle est suffisamment chaude, on éteint le filament et on établit la tension entre les deux électrodes normales.

Pour l'alimentation en alternatif, les électrodes sont deux sphères de même diamètre, l'amorçage pouvant se faire comme indiqué précédemment, ou encore en ionisant l'atmosphère de l'ampoule par une décharge lumineuse entre deux électrodes auxiliaires de magnésium alimentées par le secteur à travers une résistance. (6.000 Ω environ). L'arc s'amorce aussitôt et le courant est limité par une résistance en série avec l'arc (environ 75 ohms pour les types courants).

Certaines lampes utilisent un bilame pour supporter une des électrodes. Au repos, les deux électrodes se touchent, elles s'échauffent donc quand on établit la tension, ainsi que le bilame, qui, en se déformant, les écarte en même temps que l'arc s'amorce. L'amorçage est encore facilité par l'emploi de tungstène thorié, émettant beaucoup plus d'électrons que le tungstène pur.

ARC ENTRE ÉLECTRODES DE CHARBON

Lorsqu'on fait jaillir un arc entre électrodes de charbon, la lumière émise diffère en caractère et en intensité dans les différentes parties de la source.

En courant continu, 85% environ de l'énergie provient du cratère de l'électrode positive, 10% de l'électrode négative et 5% de l'arc lui-même. Il s'ensuit qu'aux différents points de l'espace, la densité d'énergie lumineuse n'est pas la même. Le maximum d'intensité a lieu dans la région traversée à la fois par les radiations issues des 2 électrodes et de l'arc (fig. 9). C'est en plaçant les charbons à peu près à angle droit que la source est utilisée au mieux.

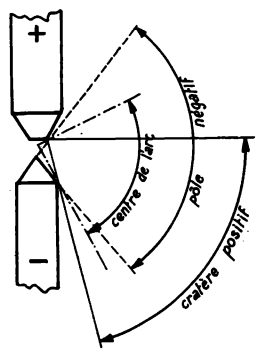


Fig. 9. - Répartition angulaire de l'émission d'un arc à charbon.

Dans l'air, les 2 charbons portés à l'incandescence se consument et leur écart augmente peu à peu; dans un gaz inerte, l'usure des électrodes est très lente. Dans tous les cas, il s'effectue un transport des ions positifs de carbone du pôle positif sur le pôle négatif, aux dépens du pôle positif qui se creuse en cratère.

Le spectre du pôle positif est presque continu; il correspond à celui du corps noir porté à température élevée (voisine de 3.500°). Il ne s'étend pas bien loin dans l'ultra-violet et l'intensité y est faible.

La flamme de l'arc donne en plus, quand il fonctionne dans l'air, des spectres de bande; en particulier, le spectre du cyanogène et les bandes de Swan du carbone (ces dernières sont très visibles vers 5.100 Å) qui se trouvent dans le domaine visible et ultra-violet; dans la région infra-rouge, on observe surtout les bandes des molécules H_2O, CO_2 et carbone.

Le charbon des électrodes étant généralement impur, il se détache sur le fond continu les raies des spectres d'arc des métaux alcalins et alcalino-terreux, du fer, du magnésium, de l'aluminium, du silicium et du cuivre.

A partir de 3.400 Å jusqu'à la limite de l'ultra-violet, le spectre parasite se compose de quelques raies du fer, du calcium, de l'aluminium et du silicium.

On améliore beaucoup la qualité de la source en purifiant les électrodes de la manière suivante : On les chauffe au rouge blanc, puis on les plonge successivement dans des solutions bouillantes d'acides fluorhydrique, nitrique, chlorhydrique. Chaque traitement est suivi d'un lavage prolongé à l'eau distillée et on termine par un séchage à l'étuve.

On trouve d'ailleurs dans le commerce des électrodes de charbon pur pour les besoins de la spectrographie.

Si, au contraire, on augmente la proportion d'impuretés en les incorporant dans les charbons, les spectres de raies sont évidemment exaltés; en même temps, on constate que l'intensité des bandes moléculaires est très affaiblie et la flamme de l'arc devient la source principale de lumière.

Dans ce sens, on obtient, avec beaucoup d'intensité, le spectre d'arc d'un métal en remplissant une cavité, creusée suivant l'axe du charbon positif, d'un sel peu volatil ; un silicate par exemple. Le garnissage peut se faire aussi au moyen d'un mélange fondu de 3 parties d'anhydride borique B_2O_3 et d'une partie du sel métallique, ou encore au moyen de quelques morceaux du métal lui-même.

Les électrodes, préalablement purifiées, sont placées verticalement, le pôle positif en bas, leur diamètre étant compris entre 5 et 7 mm. Avant d'introduire la substance étudiée dans la cavité, il convient d'enregistrer le spectre parasite.

Un rhéostat placé en série avec l'arc limite le courant électrique à quelques ampères. Pour réduire l'intensité du spectre continu donné par les électrodes incandescentes, on diaphragme la fente du spectrographe afin d'y recevoir seulement la partie de l'image de la source comprise entre les charbons. La substance disparaît en général au bout de quelques secondes. Pour éviter de recharger l'arc; il est commode d'imprégner les électrodes purifiées en les faisant séjourner dans la solution d'un sel métallique.

La stabilité de fonctionnement est meilleure lorsque l'arc fonctionne dans une atmosphère de gaz inerte comme l'argon, ce qui réduit aussi considérablement l'usure des charbons. Dans ces conditions, avec des charbons imprégnés, l'intensité de la source reste très approximativement constante pendant une vingtaine de minutes.

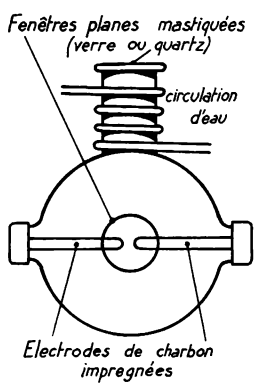


Fig. 10. - Lampe à arc en atmosphère d'argon.

La figure 10 représente une lampe à arc montée suivant ce principe. Les électrodes sont placées suivant un diamètre du ballon (diamètre 20 cm. environ); deux tubes assez longs sont soudés au récipient, leurs axes se coupant à angle droit au centre du ballon. Ils sont fermés par des disques plans, en quartz par exemple, mastiqués à la picéine sur un rodage plan. Ils soutiennent des cylindres de laiton et sont refroidis extérieurement par circulation d'eau afin d'empêcher la condensation des vapeurs métalliques sur les fenêtres.

Le dispositif permet d'utiliser la lumière émise dans une direction et, en même temps, de vérifier la constance de la source en recueillant les radiations envoyées dans la direction perpendiculaire.

ARCS ENTRE ÉLECTRODES MÉTALLIQUES

En faisant jaillir un arc entre 2 électrodes métalliques, la lumière émise comporte presque seulement les radiations caractéristiques du métal (les autres appartenant au spectre du gaz environnant).

Les métaux à point de fusion assez élevé comme le fer, le nickel, le cuivre, l'argent peuvent être utilisés comme électrodes. Celles-ci sont des tiges cylindriques, de 5 à 8 mm. de diamètre, reliées à une source de tension continue de 110 à 200 volts à travers un rhéostat d'une vingtaine d'ohms, pour limiter le courant au moment de l'amorçage de l'arc et pour régler en fonctionnement normal l'intensité entre 3 et 5 ampères.

L'amorçage se fait en amenant en contact et en écartant ensuite les électrodes ou en les court-circuitant par une tige métallique (de même nature pour ne pas introduire d'impuretés). Lorsque la durée de fonctionnement doit être longue, il y a intérêt à prévoir un dispositif assurant la rotation en sens inverse des électrodes autour de leur axe à la vitesse d'environ 5 tours par seconde, ce qui stabilise l'arc (figure 11).

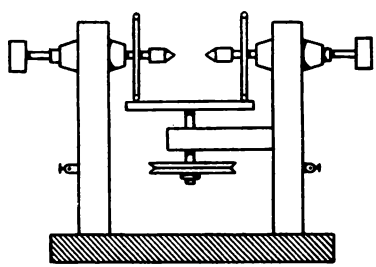


Fig. 11. - Montage pour la rotation des électrodes.

Les raies de l'arc du fer sont utilisées comme repères spectroscopiques. Dans ce cas, il est nécessaire de prendre quelques précautions pour éliminer l'effet de pôle, qui conduit à un élargissement asymétrique des raies et par suite à des erreurs dans la détermination des longueurs d'onde. Cet effet a lieu au voisinage de l'électrode négative, là où le champ électrique est le plus intense.

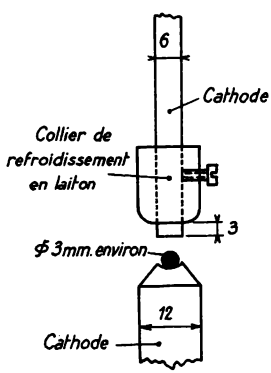


Fig. 12.
Arc au fer normal.

Il dépend de la longueur de l'arc, de l'intensité du courant et aussi de la région de l'arc utilisée, il peut atteindre 0,02 Å et disparaît quand l'arc fonctionne sous pression très réduite, inférieure à quelques millimètres de mercure.

Pfund a précisé les conditions d'utilisation et de fonctionnement de l'arc au fer pour des travaux de métrologie.

Les deux électrodes de fer coaxiales sont placées verticalement, l'anode en bas (fig. 12). Celle-ci a un diamètre de 12 mm.; elle porte dans une petite cavité un globule d'oxyde de fer, qui se forme rapidement pendant le fonctionnement à partir de petits morceaux du métal. Il doit avoir 3 mm. de diamètre environ.

L'électrode supérieure négative a 6 mm. de diamètre. Elle est entourée d'un collier de laiton, arrivant à 3 mm. de son extrémité, qui limite l'élévation de la température. L'écartement des électrodes est réglé pour que le courant soit de 5 ampères et la longueur de l'arc de 12 à 15 mm., dont on utilise seulement la portion centrale sur une longueur de 1,5 mm. maximum; c'est elle qui est projetée sur le fente du spectrographe.

On élimine ainsi l'effet de pôle et le fond continu donné très souvent par le globule incandescent.

LAMPE A ARC DANS LE VIDE

Quand l'arc fonctionne sous pression réduite, le volume lumineux est beaucoup plus important; l'intensité des raies d'étincelles augmente par rapport à celle des raies d'arc et toutes sont plus fines.

On peut diminuer la pression jusque vers 1/10 de millimètre de mercure, à condition de former au préalable l'oxyde de la cathode en allumant l'arc dans l'air quelques instants avant de faire le vide.

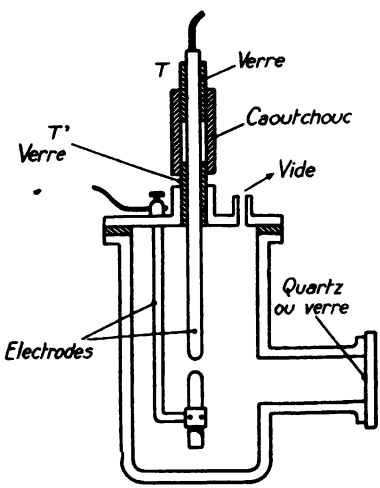


Fig. 13. - Montage simple de lampe à arc sous vide.

Il faut reformer d'ailleurs le globule d'oxyde de temps en temps car la dissociation de l'oxyde se produit pendant le fonctionnement sous pression réduite.

Dans le montage simple, qui a été utilisé par Fabry et Buisson, l'électrode supérieure est mastiquée à un tube de verre T de diamètre très voisin; elle passe librement dans le tube de verre T' fixé dans la tubulure du couvercle. Les deux tubes T et T' sont serrés et réunis par un caoutchouc à vide qui laisse un jeu suffisant pour l'allumage et le réglage de l'arc sous quelques millimètres et moins de pression (fig. 13).

LAMPES A VAPEUR DE MERCURE

Les lampes à arc dans la vapeur de mercure sont très utilisées au laboratoire comme sources de lumière monochromatique pour des travaux de spectroscopie, polarimétrie, photochimie, interférométrie, etc... La cathode est toujours du mercure, l'anode pouvant être du mercure ou un autre métal.

a) Lampes à anode et cathode de mercure. - Elles donnent un grand nombre de raies qui s'étalent depuis l'infra-rouge jusqu'à

l'ultra-violet. On trouvera dans le tableau les longueurs d'onde de ces raies et leur intensité relative.

RADIATIONS ÉMISES PAR UNE LAMPE A ARC A VAPEUR DE MERCURE

Longeur d'onde	Intensité relative	Longueur d'onde	Intensité relative
6907,5	8	3125,6	10 R
6716,4	6	3025,6	
6234,3	4	3023,4	4
6123,3	5	3021,5	4 R
6073,6	4	2967,2	10 R
5872,1		2925,4	4
5859,3		2893,6	5
5803,5	3	2805,4	4
5790,6	10 R	2804,4	
5789,6		2803,4	4
5769,6	10 R	2759,7	
5675,8	5	2752,7	4
5460,7	10 R	2699,5	
4916,0	10	2698,8	
4358,3	10	2653,6	4 R
4347,5	6	2652,0	5 R
4343,6		2576,2	10 R
4339,2	6	2536,5	10 R
4108,0	5	2534,7	8 R
4077,8	7	2482,7	
4046,5	7	2482,0	4
3906,4	5	2464,0	4
3704,2		2446,9	4
3663,2	10 R	2349,7	4 d
3654,8		2399,3	
3650,1	10 R	2345,4	
3341,4	10	2302	
3131,5	8 R		

La notation R indique que les raies peuvent être renversées.

Au spectre de raies se superpose un spectre continu qui comporte trois bandes principales dont l'intensité croît avec la pression; l'une d'elles s'écarte très peu du côté des grandes longueurs d'onde de la raie de résonance 2537 Å, la deuxième, très large, présente un maximum d'intensité vers 3.300 Å, la dernière a son maximum dans le visible à 4.800 Å. Ces bandes résultent de l'excitation des molécules Hg par les radiations produites au sein de la vapeur.

Les lampes à basse tension, généralement alimentées en courant continu sous 110 volts, sont mises en marche par basculage, l'allumage se fait automatiquement dans certains modèles. En série avec la lampe, on place une résistance et une bobine de self inductance pour limiter le courant et réduire les fluctuations

d'intensité lumineuse. L'inductance augmente d'ailleurs la finesse des raies et permet un fonctionnement de la lampe avec des courants faibles inférieurs à un ampère après quelques instants de fonctionnement en régime normal pour échauffer la lampe.

Les résultats sont encore meilleurs en stabilisant la tâche cathodique au moyen d'un ruban métallique plongeant dans le mercure et mouillé par lui car on peut encore abaisser l'intensité du courant. Les lampes peuvent être construites en pyrex ou en silice, cette dernière étant nécessaire si l'on désire utiliser tout le spectre ultra-violet.

Pendant le fonctionnement, le mercure est transporté de l'anode vers la cathode par l'intermédiaire des ions Hg^+; la température s'élève beaucoup et par suite la pression de vapeur. Les électrodes sont refroidies généralement au moyen d'ailettes d'aluminium; celles qui entourent la cathode sont à dessein de dimensions plus réduites; au voisinage de cette électrode, les parois plus épaisses et un étranglement du tube contribuent de leur côté à rendre la température du mercure cathodique un peu plus élevée que celle du mercure de l'anode. De cette façon, le métal retourne par distillation vers l'anode et la répartition du mercure entre les électrodes varie très peu.

Pour obtenir des raies très fines, il convient de faire fonctionner la lampe à petit régime afin que la pression reste faible.

En régime peu poussé, la lumière emplit complètement l'ampoule; à température plus élevée, on constate que la vapeur est illuminée très fortement dans la zone voisine de l'axe et plus faiblement vers les parois, les radiations intenses de la région centrale doivent traverser cette couche de vapeur; aussi certaines sont-elles absorbées, en particulier la raie de résonance 2537 Å.

On atténue cet effet en refroidissant les électrodes, soit par un jet d'air comprimé, soit mieux par circulation d'eau; toutefois, la condensation de la vapeur en gouttelettes qui ruissellent sur les parois rend celles-ci partiellement opaques.

On peut aussi utiliser un aimant permanent (ou un électro-aimant), en forme de fer à cheval, approché du tube de façon à ce que les lignes de force soient perpendiculaires à l'axe de la lampe; il dévie les ions en mouvement d'une électrode à l'autre et presse l'arc lumineux sur un côté du tube; l'élévation de température de cette paroi empêche la condensation en même temps qu'on diminue l'absorption par la vapeur de mercure.

b) Lampes à anode métallique. -Pour certaines applications, il est plus commode d'utiliser une lampe qui puisse fonctionner verticalement; l'anode est alors une tige de tungstène (ou de fer). Le compartiment cathodique est refroidi simplement en le plongeant dans un récipient traversé par un courant d'eau. La pression de vapeur étant réduite, la qualité du spectre est meilleure : raies fines, absence de fond continu.

Les différents types de brûleurs se trouvent dans le commerce. Si l'on désire en construire un au laboratoire, on pourra réaliser

le modèle simple de la fig. 14 avec des tubes de silice ou de pyrex de 1 cm. de diamètre environ. La vapeur se condense en B pendant le fonctionnement. On simplifie la construction des lampes en silice par l'emploi de raccords silice-pyrex, les amenées de courant se faisant par des fils de tungstène de 1 mm. de diamètre au moins soudés directement au verre Pyrex.

Le remplissage se fait par distillation du mercure sous vide dans l'ampoule, préalablement dégazée, suivant les méthodes exposées plus loin. La lampe n'est scellée définitivement qu'après plusieurs heures de fonctionnement à grande intensité en maintenant un vide élevé.

La lampe du type vertical est amorcée en approchant des électrodes les pôles d'une bobine d'induction et en chauffant un peu le mercure au besoin.

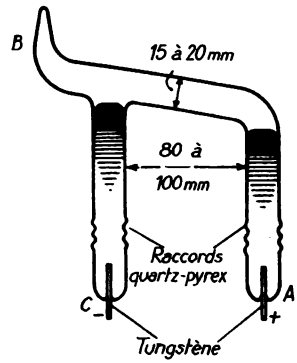


Fig. 14. - Lampe simple à vapeur de mercure .

Le courant dans la lampe alimentée sous 110 volts est de l'ordre de 3 ampères, variable suivant le refroidissement des électrodes. On montera en série un rhéostat d'une trentaine d'ohms.

Les lampes fonctionnant en alternatif sont munies de 2 anodes (fer, tungstène ou mercure) situées dans 2 compartiments communiquant avec la cathode de mercure. L'alimentation se fait au moyen d'un transformateur à prise médiane, comme pour une valve redresseuse dont le fonctionnement est identique.

c) Lampes à amalgames. - On peut enrichir le spectre de la lampe à vapeur de mercure en utilisant à la place de mercure pur des amalgames de compositions variées. En particulier, l'amalgame à 2% de cadmium, 2% de zinc et 2% de thallium donne les raies intenses suivantes dans le visible : 4680, 4722 et 4811 Å du zinc, 4678, 4800, 5086 et 5439 Å du cadmium, 5350 Å du thallium et de nombreuses radiations dans l'ultra-violet. Ces lampes ont une existence plus courte que les lampes ordinaires, les parois de silice perdant progressivement leur transparence.

d) Lampes capillaires. - Les lampes capillaires présentent un intérêt lorsqu'on veut éclairer vivement une fente, ou disposer d'une source de lumière de très faible encombrement (cas de l'étude de l'effet Zeeman, dans lequel il est nécessaire d'avoir un champ magnétique intense, donc de rapprocher le plus possible les pièces polaires).

On construira facilement un tube à décharge haute tension et basse pression, dont les chambres à électrodes seront réunies par un capillaire en silice. Le tube, contenant du mercure et du néon, est alimenté par un transformateur dont le secondaire donne 5.000 à 10.000 volts (voir paragraphe se rapportant à des lampes de principe analogue, page 327).

Daniels et Hoffman ainsi que Daniels et Heidt (J. of. Am. Chem. Soc., 1932) ont décrit la construction simple de lampes

capillaires à bismuth, cadmium, plomb, thallium, zinc et mercure qui, en général, ne peuvent servir qu'une fois.

e) Lampes à vapeur de mercure fonctionnant à haute pression. - L'efficacité lumineuse des lampes à mercure est une fonction très rapidement croissante de la pression de vapeur à courant égal; la brillance augmente également avec l'intensité du courant.

Le spectre de la lumière émise par la vapeur à haute pression diffère beaucoup de celui qu'on observe dans les lampes précédemment décrites. L'intensité du fond continu est renforcée, les raies sont toutes très élargies; celles de courte longueur d'onde sont moins intenses alors que les raies situées dans le rouge et l'infra-rouge sont plus accentuées. Une autre modification importante se produit : le diamètre de la colonne lumineuse par laquelle passe la décharge variant en sens inverse de la pression, il faut dimensionner convenablement le tube pour réduire l'auto-absorption.

On construit des lampes à refroidissement naturel dans lesquelles la pression atteint 20 atmosphères, qui fonctionnent sous 220 volts. Le tube à décharge en silice est de dimensions réduites; il est contenu dans une autre ampoule renfermant un gaz rare qui a pour mission d'assurer le refroidissement par convection. La brillance est de l'ordre de 1.000 bougies/cm^2.

Les lampes refroidies par l'eau consomment plus d'énergie; la pression en fonctionnement s'élève jusqu'à 200 atmosphères. Le tube est encore en silice avec une épaisseur de paroi de 2 mm., la décharge passe dans un capillaire de 1 à 2 mm. de diamètre entre 2 électrodes de tungstène en contact avec une quantité minime de mercure, leurs extrémités sont distantes d'environ 1 centimètre (fig. 15).

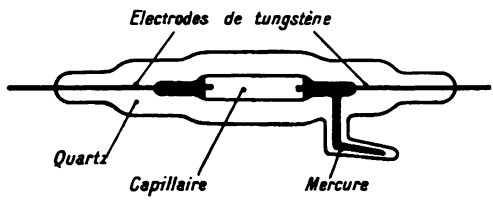


Fig. 15. - Lampe à vapeur de mercure à haute pression.

Un appendice rempli de mercure permet de régler le volume libre, donc la pression. On en diminue la longueur par fusion après fermeture de la lampe, ce qui chasse ainsi du liquide vers les électrodes. Il est nécessaire que celles-ci émergent du mercure avec lequel elles sont en contact, pour canaliser la décharge au centre du tube.

Pour faciliter l'allumage de la lampe, le capillaire contient un gaz rare sous une pression de quelques centimètres. La tension d'allumage est voisine de 600 volts. La brillance très élevée atteint 90.000 bougies/cm^2.

Les électrodes sont portées à très haute température, la chaleur est évacuée par un courant d'eau rapide traversant un bloc métallique dans lequel est fixée une nacelle de métal demi-cylindrique qui porte le tube de silice; la lumière émise sort du bloc métallique par une lentille généralement cylindrique.

f) La lampe à vapeur de mercure source d'infrarouges. - Le spectre infrarouge donné par une lampe à arc à vapeur de mercure en silice est très étendu. Il est limité dans le proche infrarouge par la transmission de la silice fondue qui devient opaque vers 7 μ et dont la transparence réapparaît au delà de 50 μ.

A la suite du visible, on observe des raies du spectre d'arc du mercure d'intensité assez grande, qui peuvent servir de repères :

10140, 11288, 13750, 13673, 36492,5 Å.

Les observations de Rubens utilisant un réseau à fils ont mis en évidence toute une série de maxima et de minima de 72 μ à 343 μ.

Le spectre se poursuit encore plus loin au delà de 600 μ. Certaines de ces radiations sont dues aux parois incandescentes de silice, d'autres appartiennent à la vapeur de mercure.

LAMPES A CATHODE CHAUDE (Pirani)

La chute de tension cathodique d'une lampe à cathode froide est très grande, de l'ordre de plusieurs centaines de volts; la tension d'amorçage est encore plus élevée.

Un abaissement considérable de la chute de tension peut être obtenu en favorisant une émission thermionique de la cathode. Dans ces conditions, la tension d'alimentation des lampes peut être abaissée jusqu'à 110 volts. D'autres avantages résultent de l'emploi d'une cathode émettrice : la densité du courant de décharge est plus grande et, par suite du nombre croissant de chocs inélastiques entre électrons et atomes du gaz, l'intensité lumineuse augmente beaucoup; les conditions de la décharge varient peu, assurant une bonne constance de l'énergie lumineuse rayonnée; on évite également la pulvérisation du métal des électrodes.

La figure 16 indique la forme des lampes usuelles. La lampe est enfermée dans une ampoule de verre ou de silice qui est vidée pour réaliser un bon isolement thermique. La portion centrale de la lampe a un diamètre plus petit que celui des deux chambres contenant les électrodes, dans le but de diminuer l'auto-absorption des raies de résonance émises par la vapeur, et aussi d'éviter la condensation de la vapeur métallique sur les parois lorsqu'on cesse d'utiliser la lampe, la température y étant plus élevée en raison de la plus grande densité de courant.

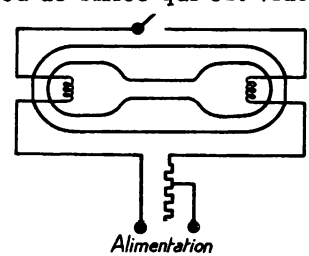


Fig. 16. - Lampe à cathode chaude.

Les électrodes sont formées d'un fil de tungstène enroulé en hélice. On les recouvre rarement du mélange d'oxydes alcalino-terreux. On place plutôt, à l'intérieur des spires, une baguette (de même diamètre) d'une substance active au point de vue thermionique qui résiste mieux au choc des ions que les enduits d'oxydes; généralement, c'est un mélange de 2 silicates de baryum : 3 Bao SiO_2, 2 BaO SiO_2 préalablement chauffé vers 1.500°, puis dégazé dans la lampe.

L'ampoule contient un gaz rare, sous une pression de l'ordre du mm de mercure, servant à amorcer la décharge.

Au démarrage, les 2 électrodes peuvent être placées en série en fermant l'interrupteur (fig.16), le courant de chauffage étant limité par le rhéostat; quand elles ont atteint leur température de régime, l'ouverture de l'interrupteur (bouton poussoir) permet d'appliquer entre elles la tension totale. Le choc des ions suffit pour maintenir les électrodes à la température convenable pour l'émission. En même temps, la température du tube s'élève, la tension de vapeur du métal (introduit par distillation) croît et son spectre se substitue en quelques minutes à celui du gaz d'amorçage.

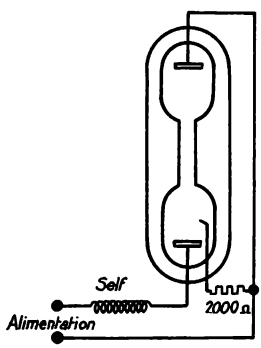


Fig. 17. - Lampe à électrode d'amorçage.

On peut toutefois amorcer la décharge sans recourir à l'émission thermionique. Une 3ème électrode auxiliaire, en forme de pointe, placée au voisinage d'une électrode, lui est reliée par l'intermédiaire d'une résistance de 1.500 à 2.000 ohms (fig.17).

La décharge s'établit initialement entre elles, par suite de la distance réduite qui les sépare. Les ions envahissent tout le volume de la lampe et le rendent conducteur. La décharge se produit enfin entre les électrodes principales suivant le chemin de moindre résistance.

Différents types de lampes. - Différentes lampes ont été construites sur ce principe : lampes à gaz rares (néon ou hélium) et lampes à vapeurs métalliques. Les métaux suivants, qui ont une tension de vapeur suffisante aux températures de fonctionnement pour lesquelles l'ampoule résiste, sont utilisés : sodium, potassium, coesium, cadmium, zinc, mercure, thallium. La température de régime du tube à vapeur de sodium est uniforme et voisine de 300°, la pression de vapeur est alors de $1,2.10^{-2}$ mm.

Pour utiliser les raies ultra-violettes, la portion centrale de la lampe peut être constituée par un cylindre de silice soudé au reste par des couronnes intermédiaires de composition convenable. L'enveloppe extérieure est également en silice ou en pyrex; dans ce cas, elle sera munie d'une collerette avec rodage plan sur lequel on mastiquera une plaque de silice qu'il faudra alors refroidir par un courant d'air violent ou tout autre moyen. Une solution commode consiste à produire, par aspiration de l'enveloppe de

verre chauffée localement, une fenêtre hémisphérique à paroi très mince, transparente jusque vers 2.200 Å.

Les lampes à sodium, faites en verre ordinaire et même en pyrex, noircissent assez rapidement par production d'une pellicule brunâtre de silicium provenant de la réduction de la silice.

On rend le pyrex plus résistant aux vapeurs de sodium en le recouvrant d'une couche mince de borax. On introduit dans le tube une solution saturée et chaude de borax puis on décante l'excés du liquide, on évapore ensuite l'eau retenue par la surface en faisant le vide; quand le verre est sec, il suffit de la chauffer au voisinage du point de fusion pour faire fondre la couche de borax et la rendre transparente.

On a d'ailleurs étudié des verres résistant aux vapeurs des métaux alcalins. Ils contiennent tous peu de silice, beaucoup d'anhydride borique et des proportions notables d'alumine et de chaux.

La silice pourra être aussi protégée temporairement par une couche mince de chlorure de sodium. Par fusion sous vide (point de fusion 800°), le sel s'étale sur la surface et cristallise au refroidissement.

Houtermann a simplifié la construction de ce genre de lampe : la portion centrale du tube est aplatie comme l'indique la figure 18, l'épaisseur de vapeur ne dépasse pas 2 mm., ainsi la température du gaz reste très sensiblement uniforme et l'auto-absorption est très faible.

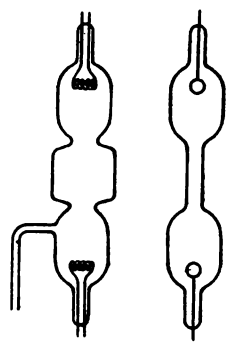


Fig. 18. - Lampe de Houterman.

LAMPE A ARC AVEC CIRCULATION DE GAZ RARE

La transparence des verres spéciaux s'arrête au proche ultra-violet; on peut utiliser pour les radiations de longueur d'onde inférieure à 3.000 Å un dispositif préconisé par Cario et Lochte-Holtgreven.

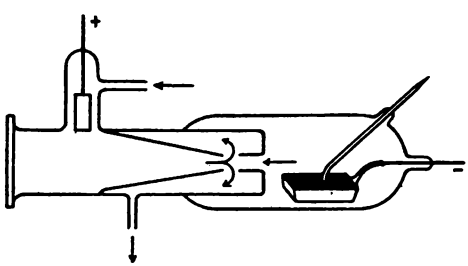


Fig. 19.
Lampe à arc à circulation de gaz.

La figure 19 représente ce type de lampe à circulation de gaz et la fig. 20 le montage complet. La pompe à condensation de mercure agit en circuit fermé. Le trajet du gaz se fait dans le sens des flèches de façon à refouler la vapeur métallique et lui interdire d'atteindre le disque de quartz ou de fluorine par lequel on observe les radiations émises par l'arc. Des pièges à air liqui-

de condensent la vapeur de mercure qui, ainsi, ne peut participer à l'émission. Le métal est introduit dans la lampe par distillation sous vide, sa vapeur va se condenser dans une petite nacelle de fer qui servira de cathode. Elle est fermée par un grillage à mailles fines pour éviter des projections du métal alcalin sur les parois au cours du fonctionnement. Celles-ci sont en effet une cause fréquente de rupture au refroidissement.

L'anode cylindrique est une feuille de nickel roulée et soudée électriquement par points le long d'une génératrice. Les électrodes doivent être dégazées avant la distillation finale dans la nacelle, par un champ de haute fréquence, ou encore par une suite de décharges à grande intensité dans le gaz rare, chaque fois renouvelé jusqu'à l'obtention d'un spectre pur. Cette méthode doit être suivie lorsque le métal alcalin n'a pas été soigneusement privé des gaz occlus.

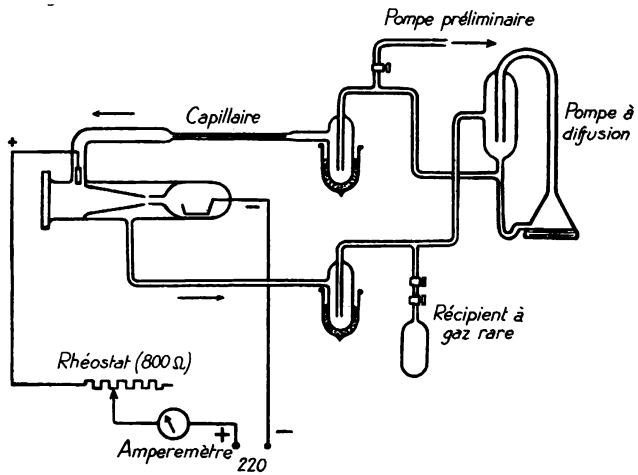


Fig. 20. - Schéma d'installation d'une lampe à circulation de gaz.

Le gaz étranger, argon ou néon, emplit l'appareil sous une pression de 1 à 3 mm. de mercure. La vitesse de circulation, ralentie au moyen d'un tube capillaire, peut être modifiée en agissant sur le chauffage de la pompe à diffusion. En fonctionnement normal, elle est réglée de façon à ce que la vapeur ne diffuse pas dans le cône le plus voisin de la fenêtre de sortie. On en est prévenu par la couleur caractéristique de la vapeur excitée, qui délimite la région contenant des atomes du métal. L'épaisseur de la couche lumineuse ne doit pas dépasser quelques centimètres pour éviter l'auto-absorption des radiations émises.

La lampe construite en pyrex ou en silice est placée en partie dans un four électrique. La fenêtre de sortie peut être simplement mastiquée sur le tube, qui doit être alors muni d'une collerette rodée. Le masticage est refroidi par un violent courant d'air, ou par simple contact avec les spires d'un tube réfrigérant à circulation d'eau. Dans le cas du sodium, la lampe fonctionne déjà vers 180°, sous une tension continue de 220 volts, avec une résistance de protection de 800 ohms nécessaire pour limiter l'intensité du

courant à une valeur normalement de l'ordre de 300 milliampères. L'intensité lumineuse est réglable par le rhéostat.

La tension continue étant appliquée et la température de fonctionnement atteinte, l'amorçage de la lampe se fait simplement en approchant d'une électrode une bobine d'induction qui rend le gaz conducteur.

LAMPES A DÉCHARGE A HAUTE TENSION ET BASSE PRESSION

a) Lampes à mercure. - La distribution énergétique des radiations de la lampe haute tension diffère notablement de celle des lampes basse tension. La pression de la vapeur de mercure ne dépasse par 1/100 de mm. dans la première, aussi la réabsorption de certaines raies par la vapeur émettrice est-elle faible. Plus de 80% de l'énergie lumineuse rayonnée se retrouve dans la seule radiation de résonance 2537 Å. Aussi cette lampe est-elle particulièrement désignée pour provoquer l'excitation des atomes de mercure. A côté des radiations du spectre d'arc, on trouve de plus, dans l'ultra-violet lointain, quelques raies appartenant au premier spectre d'étincelles ainsi que la 2e radiation de résonance, 1849 Å; elle est assez intense pour qu'on puisse l'enregistrer sur une plaque photographique, sensibilisée par une mince couche d'huile de vaseline, au moyen d'un spectrographe à optique de quartz, bien qu'elle soit absorbée en partie par cette substance et par l'oxygène de l'air.

Un tube de silice fondue d'une trentaine de centimètres de longueur, ayant quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur et environ 1 mm. de diamètre intérieur, est soudé, par l'intermédiaire de joints quartz-pyrex, à 2 chambres de pyrex contenant les électrodes généralement en fer. Elles ont la forme d'un cylindre creux ouvert à une extrémité. La tige solidaire du fond est soudée au fil de tungstène qui traverse la paroi de pyrex (fig. 21). Après un dégazage poussé des parois et des électrodes, la lampe est remplie d'un gaz rare. Sans la couper de l'installation, on la fait fonctionner pour éliminer les impuretés du gaz et des électrodes; après l'avoir vidée, on la remplit à nouveau. Par distillation, on introduit une goutte de mercure dans chacune des chambres à électrodes et on scelle définitivement.

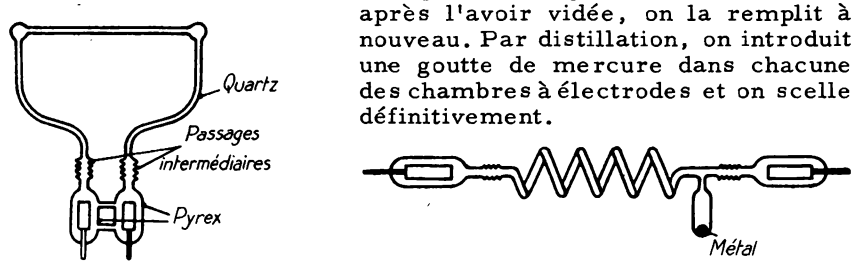


Fig. 21. - Tubes à décharge à haute tension et basse pression. - Lampe à vapeur métallique.

L'énergie lumineuse émise est liée à la pression du gaz rare. Elle passe par un maximum accusé pour des pressions faibles dépendant de la nature du gaz (argon 4 mm, néon 6 mm, hélium 5 mm).

La lampe est alimentée en alternatif par un transformateur élévateur de tension. L'amorçage de la décharge se produit au voisinage de 2.000 volts. Le courant peut être réglé facilement entre 20 et 250 milliampères; l'émission croît avec le courant. Les dimensions des électrodes dépendent du débit maximum prévu. Il faut les dimensionner largement pour éviter leur élévation de température et la pulvérisation cathodique du métal sur les parois, comme il a déjà été dit.

Dans de bonnes conditions de fonctionnement, la température reste inférieure à 80°.

b) Lampes à sodium, à cadmium, à zinc. - Des lampes du même type ont été utilisées avec d'autres vapeurs métalliques en présence de gaz rare ou d'hydrogène, comme le sodium, le coesium, le potassium, le thallium. La partie centrale du tube à décharge en pyrex est placée dans un four électrique. La vapeur métallique diffuse du tube latéral, qui contient un morceau du corps utilisé, dans le tube à décharge et elle est entraînée par un courant d'hydrogène. Le gaz est admis d'une façon continue dans la lampe à travers un capillaire et pompé à l'autre extrémité. La pression de vapeur dans la décharge dépend surtout de la vitesse de diffusion du métal contenu dans le tube latéral, qui est contrôlée par la température du four. L'intensité du courant à travers la lampe est voisine de 1 ampère sous 3.000 volts.

LAMPE A DÉCHARGE A HAUTE FRÉQUENCE SANS ÉLECTRODE

On sait depuis J.J.THOMSON qu'un gaz à faible pression s'illumine dans un champ électro-magnétique de haute fréquence. Le tube contenant le gaz ou la vapeur métallique est placé dans un solénoïde parcouru par un courant très rapidement variable, amorti ou non.

Ce sont surtout les raies des spectres d'étincelles des divers ordres qui sont émises lors de l'excitation par la décharge oscillatoire amortie. En ondes entretenues, le phénomène est différent car l'amplitude du courant oscillant n'est pas, en général, suffisante pour amener les atomes ou les molécules sur des niveaux d'énergie assez élevés; il y a prédominance des raies de faible excitation comme celles du spectre d'arc.

La pression joue un rôle important. En faisant progressivement le vide dans le tube, on constate qu'à partir d'une certaine pression, dépendant de la nature du gaz, ce dernier devient faiblement conducteur et s'illumine un peu. La conductibilité et l'intensité lumineuse varient lentement lorsque la pression décroît; puis il se produit brusquement un changement de régime, le gaz devient très lumineux et le tube s'échauffe beaucoup. Cette discontinuité se produit généralement lorsque la pression est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres de mercure. Une diminution de la pression éteint progressivement le tube et la lueur disparaît aux basses pressions.

Alimentation en ondes entretenues. - L'excitation de tubes cylindriques de 30 à 35 mm. de diamètre et de 50 mm. de longueur

demande une puissance oscillatoire minima d'une centaine de watts. Cette énergie peut être fournie par une lampe d'émission oscillant en ondes courtes (λ de 3 à 100 mètres) par exemple avec le montage de Hartley (fig.22).

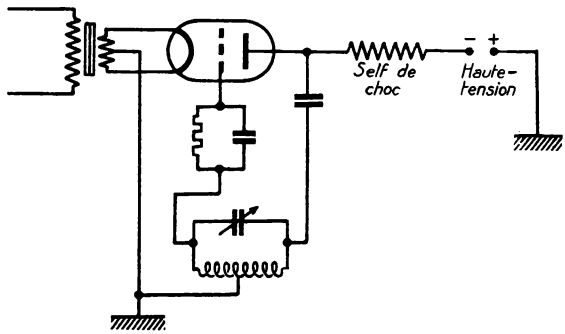


Fig. 22. - Montage de Hartley pour produire des ondes entretenues.

On peut associer 2 lampes identiques qui, séparément, ne peuvent dissiper la puissance requise, suivant le montage de Mesny (fig.23).

La résistance R doit avoir une valeur assez grande pour que la constante de temps RC du circuit qu'elle constitue avec la très petite capacité filament-grille soit égale à quelques fois la période des ondes entretenues.

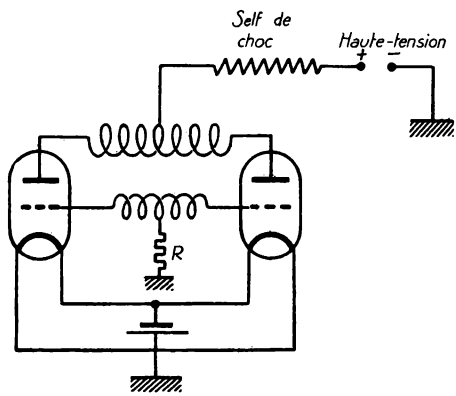


Fig. 23. - Montage de Mesny à deux lampes en parallèle.

Les tubes vidés contenant seulement un métal doivent être portés à température convenable dans un four électrique. On évite cet inconvénient en introduisant dans l'ampoule un gaz rare sous faible pression (quelques dixièmes de millimètres de mercure). La décharge échauffe initialement le gaz, la température du tube s'élève et bientôt le spectre de la vapeur du métal subsiste seul. Les conditions les meilleures dépendent de la nature du métal ; on les trouve après quelques tâtonnements lorsque la lampe est encore sur l'installation à vide.

Si la puissance dissipée par l'oscillateur est trop grande, on risque de faire fondre l'ampoule de pyrex ou de silice, ou d'avoir une pression trop élevée dans le tube, amenant un arrêt de l'émission lumineuse. Il faudra donc prévoir un réglage de la puissance (diminution du chauffage du filament de la lampe oscillatrice ou de la tension plaque).

Toutes les précautions habituelles doivent être prises en ce qui concerne la pureté des gaz et des métaux et les opérations de dégazage des ampoules. Les métaux suivants donnent facilement des spectres d'arc : cadmium, métaux alcalins, mercure, zinc, thallium, magnésium; les gaz qui peuvent être utilisés sont évidemment très nombreux. Il faut mentionner que, l'hydrogène étant facilement absorbé par les parois, un osmorégulateur est utile pour maintenir la pression à la valeur convenable.

La température n'étant pas très élevée (elle peut d'ailleurs être abaissée par un courant d'air envoyé sur l'ampoule), les raies sont fines et on peut en étudier la structure hyperfine.

La position du tube dans les spires n'est pas indifférente, certaines radiations, celles de résonance en particulier, peuvent être absorbées par la vapeur, aussi faut-il éviter de produire l'excitation maxima à l'arrière ou au centre de l'ampoule.

Alimentation en ondes amorties. - Le circuit de décharge est un montage classique (voir page 271 et suivantes).

La lumière est localisée principalement dans un espace annulaire voisin des parois du tube, d'où proviennent les radiations liées aux états d'excitation les plus élevés (spectres d'étincelles des divers ordres).

L'augmentation de la tension de décharge fait apparaître de nouvelles raies qui appartiennent à l'atome dans un degré d'ionisation supérieur. On peut ainsi obtenir progressivement les groupes de radiations attribuables aux états successifs d'activation de l'atome.

On relève souvent dans les spectrogrammes un grand nombre de raies résultant de la décomposition des parois.

TUBES DE GEISSLER

Ces tubes, d'emploi facile, permettent d'obtenir une grande variété de sources. La faible pression du gaz est choisie de façon à ce que la tension entre les électrodes soit la plus petite possible.

Les tubes à néon (pression 4 mm. de mercure) donnent des raies nombreuses dans le rouge; les tubes à hélium (pression 8 mm.) donnent des radiations brillantes réparties dans tout le spectre; les tubes à hydrogène ont été étudiés spécialement à cause de leur spectre d'émission continu; ils donnent aussi les raies de la série de Balmer.

On augmente la brillance de la lampe en condensant la décharge dans un tube capillaire à parois épaisses. L'observation peut se faire en bout à travers une fenêtre transparente dans le domaine étudié (fig. 24). Le capillaire chauffe beaucoup si la décharge est intense, dans ce cas, il vaut mieux construire la lampe en silice et prévoir un refroidissement par eau (voir lampe à hydrogène.).

Les électrodes, généralement en aluminium, ont des dimensions relativement importantes afin de réduire leur échauffement et la pulvérisation cathodique. Certains gaz sont très absorbés par les électrodes et les parois, ce qui réduit beaucoup dans certains cas, la durée d'emploi. L'alimentation des tubes se fait par bobine d'induction ou par transformateur.

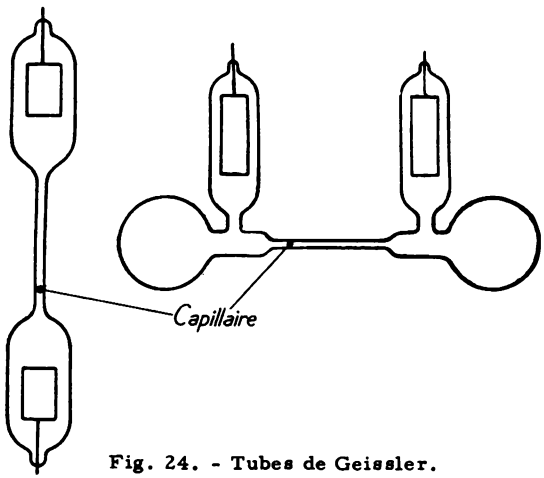


Fig. 24. - Tubes de Geissler.

La décharge électrique, dans un tube de Geissler contenant sous faible pression de l'hydrogène ou de l'hélium, donne aussi des radiations infrarouges intenses dont certaines peuvent servir d'étalons; ce sont pour l'hélium les raies 10830,3Å - 10829,1Å et 20851,3 Å, pour l'hydrogène 12817,5 Å et 18751,3 Å.

Lampe à hydrogène. - La décharge alternative passant dans l'hydrogène à basse pression donne naissance à un spectre complexe intense qui s'étend depuis le rouge jusqu'à l'ultraviolet lointain de la région de Shumann. Il se compose de radiations monochromatiques superposées à un spectre continu : au-dessous de 3650 Å, ce dernier est pur. Les raies sont celles de la série de Balmer de l'atome d'hydrogène et du spectre secondaire; le fond continu est d'origine moléculaire.

Les études de Chalonges et Lambrey et de Gonsalvès ont montré que, dans la partie du spectre continu qui s'étend de 3200 jusqu'à 1.600 Å, le rapport des intensités de 2 radiations arbitrairement choisies est presque indépendant de la pression et du courant, dans de très larges limites. La constance du rapport est vérifiée à 10% près. L'intensité est maximum quand la pression est voisine de 3 mm. A pression constante, elle croît avec le courant, d'abord proportionnellement jusque vers 250 milliampères, puis ensuite plus lentement.

Dans des conditions de fonctionnement déterminées, la courbe de l'énergie en fonction de la longueur d'onde présente un maximum vers 2200 Å; de plus, la distribution énergétique reste constante dans les différentes régions spectrales, ce qui permet l'utilisation de la lampe en photométrie et pour l'étude des spectres

d'absorption. Sous l'influence des radiations émises par la lampe, l'oxygène de l'air, dont les bandes d'absorption sont situées au-dessous de 1950 Å, est transformé en ozone qui peut lui-même absorber de façon notable dans la région 2650 Å, correspondant à son maximum d'absorption.

Les raies de la série de Balmer sont dans le visible les raies H_α : 6564,6 - H_β : 4862,7 - H_γ : 4341,7 - H_δ : 4102,9 Å. Elles sont émises surtout dans la portion centrale du tube et le spectre secondaire au voisinage des électrodes qui catalysent le retour à l'état moléculaire. Lorsque le tube contient de l'hydrogène humide, l'intensité des raies de Balmer est considérablement renforcée, par contre le spectre secondaire apparaît presque pur en l'absence de toute trace de vapeur d'eau. On obtient le même résultat en déposant par voie chimique une couche d'argent semi-transparente sur les parois internes du tube à décharge.

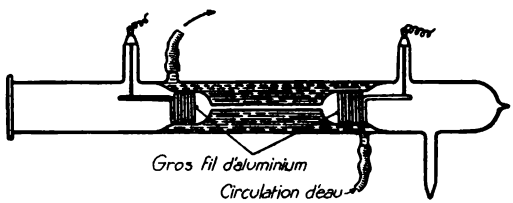


Fig. 25. - Lampe à hydrogène.

Dans le modèle de Dunoyer (fig. 25) les électrodes sont constituées par de gros fils d'aluminium enroulés en hélice à spires jointives, de 3 centimètres de diamètre environ. La lumière émise dans le tube capillaire, qui a 10 cm. de longueur et 3 mm. de diamètre intérieur, sort par une fenêtre plane en silice ou en fluorine scellée à l'extrémité du tube. La fenêtre de silice peut être soudée directement au moyen d'un raccord cylindrique silice-pyrex. Un petit tube latéral contient du potassium distillé absorbant au besoin l'humidité.

Le tube en fonctionnement est refroidi, ainsi que les électrodes, par une circulation d'eau.

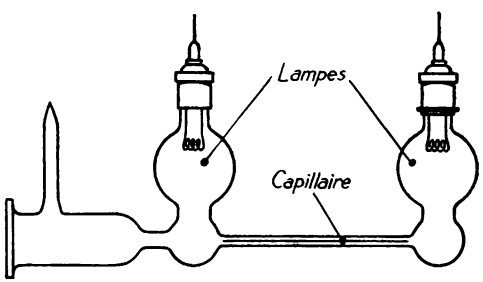


Fig. 26. - Type simple de lampe à hydrogène.

Chalonges et Lambrey ont décrit une lampe facile à construire (fig. 26). Un tube capillaire relie 2 lampes à incandescence à gros filaments de tungstène qui servent d'électrodes. Elle a l'inconvénient de "durcir" car l'hydrogène est absorbé assez rapidement

en même temps que le tungstène est projeté sur les parois. Il faut donc la munir d'un osmorégulateur pour faire remonter la pression du gaz de temps à autre (fig. 47 et 48).

L'alimentation de la lampe se fait par un transformateur donnant 2.000 volts au secondaire. Une bobine de self (ou un rhéostat), en série avec le primaire, permet de régler la tension d'alimentation et le courant débité qui doit pouvoir varier entre 20 et 300 milliampères. Ce dernier est contrôlé, au cours de l'utilisation, pour fixer le régime de la décharge.

La décharge avec électrodes extérieures ou sans électrodes, au moyen d'un champ électro-magnétique de haute fréquence, permet une construction extrêmement simple du tube, tout en silice donc sans masticage, et sans circulation d'eau. Un gros avantage résulte de la possibilité de dégazer très soigneusement les parois par chauffage direct au moyen d'un four électrique ou, avant de sceller le tube définitivement, par la décharge à grand régime dans une atmosphère d'hydrogène plusieurs fois renouvelée.

Le réglage de l'intensité lumineuse se fait en agissant sur le chauffage ou la tension anodique des lampes oscillatrices.

Le schéma de montage électrique a déjà été indiqué (fig. 22 et 23).

LAMPES DE SCHULER

La décharge dans un tube de Geissler dont la cathode est un cylindre ouvert aux deux extrémités présente un aspect particulier lorsque la pression du gaz atteint une valeur critique de l'ordre du millimètre de mercure (qui est fonction du diamètre de la cathode). La lueur devient très brillante à l'intérieur du cylindre cathodique. La brillance varie le long d'un rayon, elle est concentrée et forte dans la région qui entoure l'axe du cylindre. L'effet Stark intervient très peu pour élargir les raies, la chute de tension étant faible dans la région centrale.

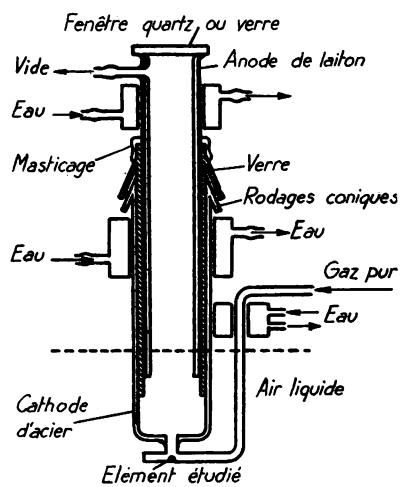


Fig. 27. - Lampe de Schüller

Schüler a décrit un modèle de lampe très utilisé pour l'étude de la structure hyperfine des raies.

La cathode est un tube d'acier, de 30 cm. de longueur et de 5 cm. de diamètre, terminé par un cône rodé. L'anode est un tube de laiton concentrique à la cathode; elle en est séparée par un tube de verre qui porte un cône rodé venant coiffer le cône précédent. L'appareil est rendu étanche par masticage; il est refroidi en plusieurs endroits par des chemises à circulation d'eau

(fig.27). La substance, grosse comme un pois, est déposée au besoin au fond de la cathode. La pression du gaz rare est comprise entre 1/100 et 1 mm. L'expérience donne la valeur optima. La lumière cathodique apparaît seule puisque la pression est faible. La cathode baigne directement dans l'eau, l'air liquide ou même l'hydrogène liquide, elle est enfoncée de 10 cm. environ.

On obtient ainsi des raies de grande finesse. La tension continue de fonctionnement dépend de la pression (ordre de grandeur 1000 à 2000 volts); l'intensité du courant traversant le gaz doit pouvoir varier entre 20 et 300 milliampères.

Mitchell (Journ. Frank. Inst. 212, 311, 1931) a construit sur ce principe une lampe en verre. La cathode est constituée d'un cylindre de nickel (10 cm. de longueur, 1 cm. de diamètre) partiellement rempli de zinc, 2 anneaux de métal servant d'anode.

La lampe contient un gaz rare sous quelques millimètres de pression au plus. La cathode s'échauffe suffisamment par le bombardement des ions positifs pour provoquer une vaporisation du zinc; elle n'est pas refroidie. L'observation se fait dans la direction de l'axe commun aux 2 électrodes à travers une fenêtre plane de silice, protégée de la condensation de la vapeur métallique au moyen d'un dispositif analogue à celui de la lampe Cario-Lochte-Holtgreven (fig.19 et 20).

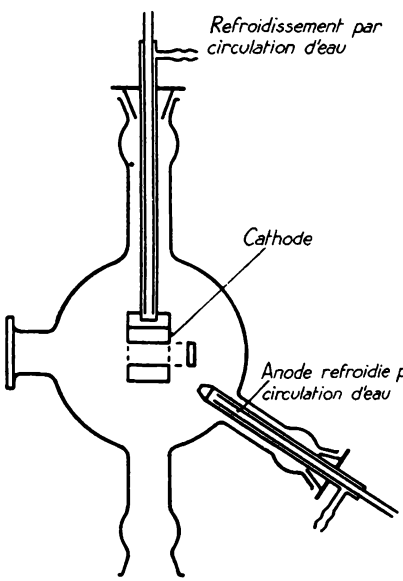


Fig. 28. Lampe à lueur cathodique.

Un autre appareillage a été utilisé pour étudier la lueur cathodique (fig. 28).

La cathode est un bloc d'aluminium percé d'une ouverture rectangulaire (de 2 mm. sur 20); elle est soutenue au centre du ballon par une tige dans laquelle circule l'eau de refroidissement; l'anode est également refroidie. La pression du gaz est de plusieurs millimètres de mercure. Sous une tension de 600 à 800 volts, l'intensité de courant de décharge atteint 1,5 ampères.

En plus du spectre caractéristique du gaz, on observe les raies du métal de la cathode, à la suite de la pulvérisation de celle-ci. La nature du gaz rare utilisé influe sur la qualité des raies caractéristiques du métal.

L'hélium est moins actif pour pulvériser que le néon et l'argon plus lourds, mais le premier, ayant un potentiel d'ionisation voisin de 20 volts, supérieur en général à celui des atomes des divers métaux, fera apparaître les raies d'arc et d'étincelles du métal; il n'en est pas de même avec l'argon dont le potentiel d'io-

nisation est de 11,5 volts, seulement, on ne verra alors que les raies d'arcs des métaux usuels.

LAMPES A LUMIÈRE MODULÉE

On peut moduler la lumière en utilisant les propriétés rappelées précédemment de la lueur négative : brillance proportionnelle au courant de décharge, inertie très petite aux variations de tension. On détermine le point de fonctionnement statique en prenant des valeurs moyennes du courant et de la tension sur la caractéristique de décharge.

La lueur est concentrée dans l'espace restreint compris entre deux électrodes cylindriques de même axe. Le tube est rempli par un mélange de gaz rares, hélium et néon, additionnés de quelques centièmes d'azote; la lumière cathodique est alors très riche en radiations violettes et ultra-violettes.

Un modèle plus simple est représenté sur la figure 29. La cathode est une tige métallique contenue dans un tube isolant qui porte l'anode formant diaphragme. La tension d'alimentation est de 400 volts. Le courant peut varier entre 100 et 400 milliampères, l'impédance de la lampe est faible (30 à 50 ohms). De telles lampes peuvent servir de sources ponctuelles.

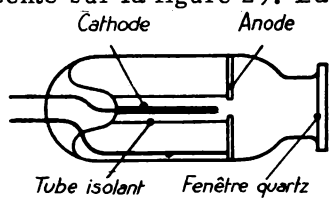


Fig. 29.
Lampe à lumière modulée.

La surface cathodique lumineuse peut être augmentée sans inconvénient, par exemple en prenant comme électrodes 2 plaques identiques de molybdène ou de tungstène de 5 cm. de côté environ, très rapprochées (distance 1 mm.). La tension de fonctionnement est de l'ordre de 200 volts; la brillance varie autour d'une valeur correspondant au point de fonctionnement statique.

SOURCES PONCTUELLES

La décharge dans les gaz rend possible l'obtention de sources ponctuelles à grande brillance, en concentrant la colonne positive dans un espace restreint.

Pour réduire la chute de tension cathodique, la cathode chauffée est à oxydes; elle est placée à l'intérieur d'un cylindre vertical isolé qui porte un petit tube horizontal de 10 mm. de longueur et de 2 mm. de diamètre; au voisinage de l'extrémité, un anneau sert d'anode (fig.30). Le petit tube est traversé par une partie de la colonne positive; la brillance suivant son axe peut atteindre 600 bougies/cm^2 avec le néon.

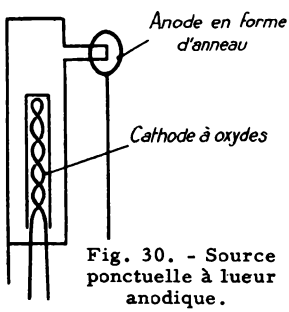


Fig. 30. - Source ponctuelle à lueur anodique.

La tension d'alimentation est comprise entre 80 et 90 volts et l'intensité du courant atteint une fraction d'ampère.

SPECTRES DE FLAMMES

La flamme d'un bec Bunsen ou Méker, qui normalement est très peu éclairante et donne un spectre continu très peu intense, a une brillance très accrue, de l'ordre du centième de bougie/cm^2, lorsqu'on y introduit des sels métalliques volatils. Le spectre est simple, les raies monochromatiques caractéristiques émises peuvent, en dehors de leur utilisation pour l'analyse chimique, avoir quelques applications.

On introduit la substance dans la flamme par le dispositif de la figure 31. On utilise le plus souvent les chlorures; les bromures, plus volatils, donnent aux flammes un éclat plus grand. Remarquons que leur dissociation libère du chlore ou du brome qui peuvent attaquer les appareils voisins.

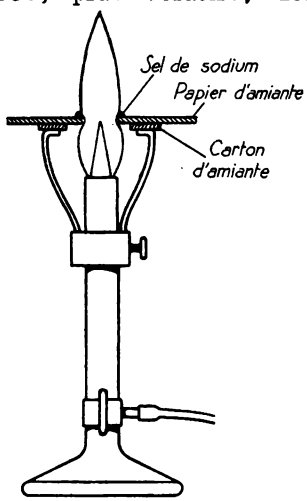


Fig. 31. - Bec Bunsen monté pour recevoir un sel métallique.

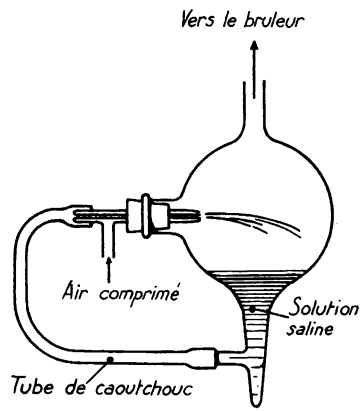


Fig. 32. - Pulvérisateur de Gouy.

Pour des expériences de longue durée, afin que l'apport de substance reste uniforme et l'intensité constante, plusieurs méthodes ont été préconisées. Dans le montage de Gouy, représenté fig. 32, la solution saline est pulvérisée par de l'air sous pression qui, après s'être chargé des gouttelettes les plus fines, alimente un bec Bunsen comportant une tubulure supplémentaire.

La brillance peut être encore augmentée en employant une flamme à température plus élevée, telle que celle donnée par les mélanges de gaz et d'air comprimé, de gaz et d'oxygène et d'acétylène. Pour les flammes les plus chaudes, il est nécessaire de surmonter le bec normal d'un tube de silice effilé.

A mesure que la flamme est plus chaude, le spectre devient plus complexe : le fond continu augmente en intensité, de plus, il apparaît des bandes caractéristiques de la flamme (celles de la vapeur d'eau dans l'ultra-violet en particulier) et même des éléments qu'on y a incorporés; il s'enrichit de raies nombreuses correspondant à des niveaux d'énergie plus élevés.

Le tableau suivant donne les longueurs d'onde de quelques raies de métaux dans le visible, émises par la flamme d'un bec Bunsen.

Longueur d'onde	Elément	Longueur d'onde	Elément
7947,6	Rb	4800	Cd
7800,3	Rb	4678,1	Cd
7699	K	4607,3	Sr
7664,9	K	4593,2	Ca
6707,9	Li	4555,3	Ca
6438,5	Cd	4511,3	In
5895,9	Na	4215,5	Rb
5890	Na	4201,8	Rb
5350,5	TI	4101,8	In
5085,8	Cd	4044,2	K

SPECTRES EXCITÉS PAR CHOCS ÉLECTRONIQUE CONTROLÉS

L'excitation des atomes peut se faire directement par chocs, au moyen d'électrons. En apportant à l'édifice atomique une énergie déterminée, on pourra contrôler l'excitation et faire apparaître successivement les raies spectrales, en commençant par les radiations de résonance.

Le choix de la cathode dépend de l'intensité du courant désiré et de l'effet possible sur elle de la vapeur ou du gaz.

En général, par suite de la loi de distribution des vitesses des électrons émis par la cathode, identique à celle de Maxwell pour les gaz, il y a intérêt à utiliser des sources à température peu élevée si l'on veut avoir des électrons de vitesse peu différente. Cette condition oblige également à choisir des cathodes équipotentielles.

Les électrons sont accélérés par la différence de potentiel établie entre la cathode et une grille, aussi proche que possible de la cathode pour que la probabilité de rencontre soit plus grande dans l'espace grille-anode. Ceci est important pour exciter les niveaux de grande énergie où il convient que les chocs inélastiques, entre atomes et électrons, qui n'ont pas encore acquis l'énergie suffisante, soient peu nombreux.

Par contre, pour augmenter le nombre des chocs efficaces, il est nécessaire d'éloigner le plus possible de la grille, la plaque collectrice portée à un potentiel plus positif (de quelques dixièmes de volt) que celui de la grille pour réduire l'effet retardateur de la charge d'espace dont sont responsables les électrons dans cette région.

Très souvent, il apparaît une différence de potentiel de contact entre les électrodes dont il faut tenir compte. On la mesure simplement en comparant la valeur connue du potentiel d'ionisation de la substance utilisée à la valeur expérimentale.

L'anode est une feuille de nickel demi-cylindrique.

La cathode équipotentielle est placée parallèlement à l'axe de la lampe (fig.33) ou dans une direction perpendiculaire. Dans cette dernière position, le faisceau électronique a une épaisseur faible ainsi que la tranche de vapeur excitée. On diminue ainsi l'auto-absorption par le gaz des radiations de résonance qu'il émet. On gagnera en intensité pour ces raies en plaçant de plus la cathode assez près de la fenêtre de sortie en pyrex ou en silice, suivant les longueurs d'onde.

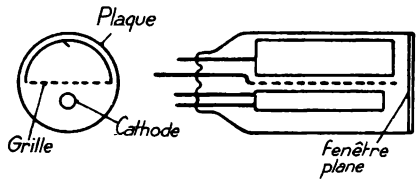


Fig. 33. - Lampe utilisant les chocs électroniques.

La lampe est placée dans un four électrique porté à température convenable pour que la tension de vapeur soit suffisante (un peu inférieure au 1/10 de millimètre de mercure).

La tension accélératrice doit être supérieure à la tension théorique de façon à avoir une bonne probabilité d'excitation. (fig.34).

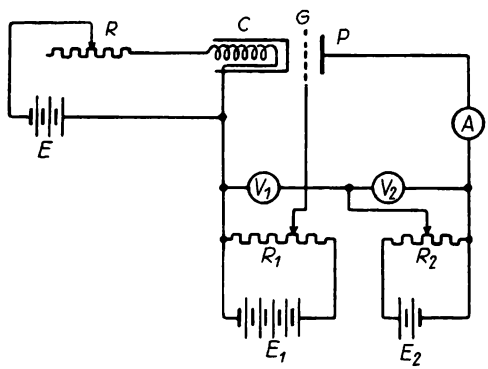


Fig. 34. - Montage électrique de la lampe de la fig. 33.

La lumière émise est, dans ces conditions, de faible intensité, mais a l'avantage de ne comporter si on le désire qu'une radiation monochromatique. Elle sera concentrée au moyen d'une lentille et les radiations produites par la cathode chaude masquées par un cache.

La vapeur de mercure donnera par exemple seulement la radiation 2536 Å lorsque les électrons auront une énergie de 4,9 électrons-volts. Dans la vapeur de magnésium, on obtient la raie 4571 Å avec des électrons accélérés sous 3,2 volts et les 2 raies 4571 Å, 1852 Å avec 6,5 volts.

L'émission de ces radiations monochromatiques peut se faire à des instants déterminés en appliquant une différence de potentiel alternative d'amplitude convenable entre la cathode et la grille.

Lorsque la tension d'accélération est suffisante, les atomes sont ionisés et leur neutralisation donne naissance au spectre d'arc.

Quand on désire obtenir uniquement le spectre complet d'un élément avec beaucoup d'intensité, il suffit de simplifier le montage précédent en ne conservant que la cathode et la plaque.

Avec le mercure par exemple, la lampe peut être alimentée sous 110 v. avec un rhéostat limitant le courant à 1 ampère environ.

Mitchell a décrit une lampe à vapeur de zinc qu'il a construite sur ce principe.

SOURCES DE LUMIÈRE BRÈVE DE GRANDE INTENSITÉ

DÉCHARGE INSTANTANÉE DANS UN GAZ

Un premier procédé consiste à faire éclater une étincelle condensée dans un gaz. Le dispositif des frères Seguin est le suivant (fig. 35).

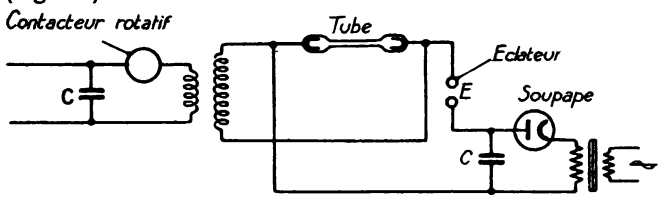


Fig. 35. - Montage pour produire des éclairs brefs.

Les électrodes du tube à gaz sont réunies, par l'intermédiaire d'un éclateur, aux bornes d'une puissante batterie de condensateurs chargés par un courant continu à haute tension obtenu en redressant le courant alternatif du secteur. Les fils de connexion doivent être très courts pour que le coefficient de self-induction du circuit de décharge soit petit.

La distance des boules de l'éclateur est réglée pour que la décharge ne puisse passer sans amorçage préalable du tube. La décharge dure un temps très court compris entre 10^{-6} et 10^{-5} seconde, elle dissipe instantanément l'énergie accumulée dans les condensateurs, en produisant une grande puissance lumineuse. L'amorçage est obtenu simplement en provoquant, grâce à un circuit auxiliaire, une faible illumination du gaz qui devient ainsi conducteur. Ceci est obtenu au moyen d'un contacteur rotatif qui décharge dans le primaire d'un transformateur un condensateur chargé sous quelques centaines de volts.

La vitesse de rotation du contacteur règle la fréquence des éclairs lumineux.

Dans le montage de Laporte, figure 36, on dispose à la place de l'éclateur un thyratron en série avec le tube de décharge. La grille du thyratron est polarisée négativement pour le bloquer; le condensateur peut alors être chargé sous une tension supérieure à la tension d'allumage du tube. En modifiant la tension de la grille

de commande, on pourra à volonté provoquer une décharge, silencieuse et très brève, dans le gaz (durée 10^{-5} sec).

Dans ce montage, qui donne des éclairs lumineux à la fréquence du secteur, la tension de grille est déphasée par rapport à celle de l'anode par la capacité en série avec la résistance, le tout étant alimenté par le potentiomètre; on peut régler facilement l'amplitude de la tension de commande et le déphasage, qui interviennent dans le fonctionnement du système.

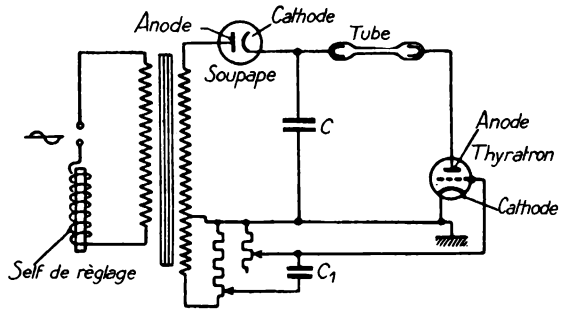


Fig. 36. - Montage de Laporte.

Le spectre de la lumière émise par un tube à xénon est très actinique, il comporte des raies et un fond continu s'étalant loin dans l'ultra-violet.

EXPLOSIONS DE FILS

La volatilisation instantanée d'un fil est un second procédé qui fournit des sources de grande brillance.

On fait passer à travers un fil métallique mince (diamètre 0,15 mm. environ, longueur 5 cm.) un courant très intense provenant de la décharge d'un condensateur de grande capacité (0,5 microfarad) soumise à une différence de potentiel élevée continue (50 à 100.000 volts). Le fil est volatilisé dans un temps très court, de l'ordre de quelques dizaines de micro-secondes, en émettant, par suite de la très haute température atteinte, qui peut dépasser 20.000°, un spectre continu dans lequel manquent toutefois certaines radiations correspondant aux raies d'émission de la vapeur du métal. Les raies renversées, assez larges (10 Å) sont les raies du spectre d'arc; l'absorption se produit dans un volume annulaire où la vapeur est plus froide.

Le spectre continu s'étale de 2200 Å jusqu'à 5000 Å environ lorsque le fil explose dans l'air à la pression normale. En opérant à basse pression, le spectre continu est peu intense et les raies caractéristiques de la vapeur métallique sont très brillantes; ce sont surtout les radiations du spectre d'étincelle qui sont émises jusque vers 1000 Å. La majorité des raies sont émises par l'atome ionisé du métal. Lorsque la pression croît, les raies perdent progressivement leur intensité et sont complètement renversées

vers 20 cm. de mercure, alors que l'intensité du fond continu va croissant.

Il est nécessaire, pour obtenir un spectre pur, que les mâchoires de serrage du fil soient de même nature que le fil lui-même, pour ne pas introduire de raies étrangères. Les supports du fil ne doivent pas présenter d'angles vifs.

On peut remplacer le fil métallique par un fil fin d'amiante, préalablement plongé dans une solution d'un sel; il est alors susceptible de servir plusieurs fois.

Les divers éléments qui figurent dans le schéma de montage (fig.37) sont employés couramment dans les installations à rayons X (voir Chapitre Rayons X)

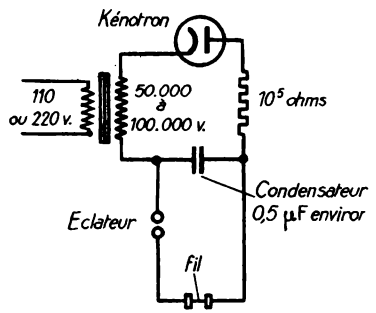


Fig. 37. - Montage pour l'explosion de fils.

Comme précédemment, le coefficient de self-induction du circuit de décharge doit être petit pour que l'énergie utilisée par le fil soit maximum.

Quand on opère dans le vide, les supports du fil sont placés dans 2 tubulures d'un ballon de pyrex, une troisième tubulure permet par un rodage mastiqué de faire communiquer le ballon avec le spectrographe placé dans le vide.

SPECTRES D'ÉTINCELLES

GÉNÉRALITÉS.

Les arcs électriques dans l'air présentent quelques inconvénients; leur stabilité laisse à désirer, la volatilisation des électrodes oblige à des réglages fréquents. L'emploi de l'étincelle est, dans ce sens, plus favorable; elle permet également d'utiliser comme électrodes aussi bien des tiges métalliques que des poudres ou des liquides.

Les étincelles sont produites lors de la décharge oscillante d'un circuit comportant self, résistance, capacité; le condensateur est chargé au moyen d'un transformateur élévateur de tension, par exemple avec un transformateur de 2 kVA sous 5000 volts. Lorsque la tension aux bornes du condensateur devient égale au potentiel disruptif, l'étincelle jaillit entre les boules de l'éclateur. En fixant convenablement leur écartement, la décharge oscillante pourra passer une ou plusieurs fois à chaque alternance (fig.38).

Le spectre émis dépend du régime de la décharge. Les étincelles produites par un circuit de grande capacité et de faible coefficient de self-induction donnent naissance à deux catégories

de raies, les unes dues au gaz dans lequel sont plongées les électrodes, les autres provenant des pôles. Les spectres d'étincelles dans l'air contiennent les raies de l'azote et de l'oxygène du deuxième et du troisième ordre N_{II} et N_{III}, O_{II} et O_{III}. Leur intensité est souvent supérieure à celle des radiations du métal; de plus, elles sont très diffuses.

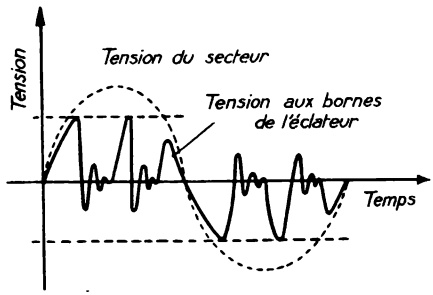


Fig. 38. - Décharge du condensateur dans l'alimentation en courant alternatif.

Le gaz est rendu d'abord incandescent par la décharge initiale qui apparaît sous forme d'un trait lumineux, puis la vapeur métallique se répand dans l'espace interpolaire; elle est traversée par le courant oscillant qui l'excite et fait apparaître une auréole qui entoure le trait. Lorsque le coefficient de self-induction du circuit a une valeur notable, la décharge initiale est très affaiblie et le spectre du gaz est en partie éliminé. On peut le faire disparaître totalement en réglant l'écartement des électrodes pour qu'à la fin de chaque train d'ondes, la vapeur métallique soit encore présente entre elles. Les raies émises dans ces conditions sont plus fines.

La théorie montre que l'amplitude I_o de l'intensité du courant de la première oscillation a pour valeur, lorsque la résistance du circuit est faible

$$I_0 = \frac{2\pi C V_0}{T} = V_0 \sqrt{\frac{C}{L}}$$

(C capacité du circuit de décharge, L coefficient de self-induction, T période des oscillations, V_0 tension aux bornes du condensateur). En prenant $T = 2.10^{-6}$ seconde, $C = 0,05.10^{-6}$ farad, $V_0 = 10.000$ volts, on trouve : $I_0 = 1570$ amp.

Pour conserver la même valeur de $T = 2\pi\sqrt{LC}$, on peut diminuer L et augmenter C, ce qui produit un accroissement important de I_0.

Les maxima d'intensité décroissent rapidement par suite de l'amortissement. Pour un circuit de décharge à étincelles, le décrément des oscillations est voisin de 0,1; le nombre des oscillations au bout duquel la valeur efficace du courant est négligeable est relativement faible, mais la valeur efficace du courant est tout de même importante, bien que le temps qui s'écoule entre deux décharges successives soit grand par rapport à la durée de chaque train d'oscillation. Pour cette raison et surtout à cause de l'effet de peau, il convient d'utiliser des conducteurs de cuivre de grande section, en barres ou en tubes.

Choix du transformateur - Le courant efficace absorbé par le condensateur est $I_{eff} = \omega C V_{eff}$; la puissance apparente du transformateur sera $I_{eff} \times V_{eff}$; avec les données numériques précé-

dentes, on aurait $I_{eff} = 0,157$ ampères et la puissance apparente serait : 0,157 : 10.000 = 1.570 V.A.

Construction des capacités. - On utilise des plaques de verre comme diélectrique; les armatures sont des tôles d'aluminium d'un millimètre d'épaisseur dont les dimensions sont plus petites que celle du diélectrique. Elles sont découpées comme l'indique la figure 39; les arêtes et les coins sont arrondis. On les réunit de 2 en 2, le tout est plongé dans un bac de verre rempli d'huile préalablement désséchée par un chauffage prolongé au-dessus de 100°. La formule $C = \frac{KS}{4\pi e}$ permet de déterminer la capacité (pour le verre K = 6).

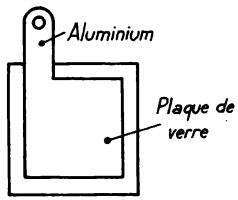


Fig. 39. - Forme à armature de condensateur.

Construction de la Self. - Le fil de cuivre est enroulé sur un tube de bakélite ou de verre. On peut également construire une self avec du ruban de cuivre enroulé en spirale et soutenu par des baguettes d'ébonite par exemple, portant des encoches dans lesquelles passent des spires circulaires de la self.

Le coefficient de self-induction se calcule alors par la formule :

$$L = k\, n^2\, D \qquad k = \frac{100}{4 + 11\,\frac{h}{D}}$$

(D diamètre moyen de l'enroulement, h largeur occupée par l'enroulement, n nombre total de spires).

Les montages électriques généralement utilisés produisent des ondes amorties.

On cherche à réaliser, dans le circuit de charge du condensateur, la condition de résonance sur la pulsation du secteur pour éviter une dissipation superflue d'énergie.

L'amplitude de la tension pseudo-périodique aux bornes de la capacité croît progressivement et devient supérieure à la tension appliquée.

A la résonance, on sait que tout se passe approximativement comme si le transformateur et la capacité C étaient remplacés par un condensateur de capacité $C\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$ intercalé directement dans le circuit (n_1 et n_2 nombre de spires du primaire et du secondaire).

La résonance est obtenue en réglant une self à noyau de fer placée dans le primaire du transformateur; le courant qu'il absorbe est alors maximum, en même temps, le nombre des étincelles par seconde est minimum, il peut être de 2 ou 3; en s'éloignant de la résonance, le rythme des décharges s'accélère.

La self de réglage doit être prévue pour un courant possible :

$I = C\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \omega\, U_1$, U_1 désignant la tension du secteur.

Le montage peut aussi être fait très simplement sans réaliser les conditions de résonance, si on ne cherche pas à avoir un bon rendement.

Il faut observer que, pendant la décharge du condensateur, l'espace entre les éclateurs devient très conducteur; il est aussi traversé par un courant provenant du secondaire du transformateur, courant qui peut persister et par suite empêcher de recharger le condensateur. Aussi, quand on veut mettre en jeu des puissances importantes, on est amené à chasser l'air ionisé, conducteur, par soufflage.

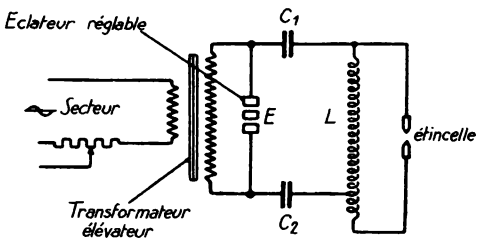


Fig. 40. - Montage électrique pour la production d'étincelles par ondes amorties.

Les deux capacités du montage de la figure 40 permettent d'isoler le circuit d'utilisation de la haute tension du transformateur. La self plate spiralée est montée en auto-transformateur.

Bien qu'il soit plus commode d'utiliser le courant alternatif pour charger le condensateur, on peut utiliser dans le même but un courant redressé par un kénotron ou un phanotron suivant la valeur de la tension inverse.

On utilise également les montages produisant des ondes entretenues.

Leurs avantages résultent du fait que les conditions physiques de production des étincelles restent les mêmes au cours du temps; les raies de l'azote et de l'oxygène sont très affaiblies, sinon absentes des spectres, des ions étant toujours présents entre les électrodes.

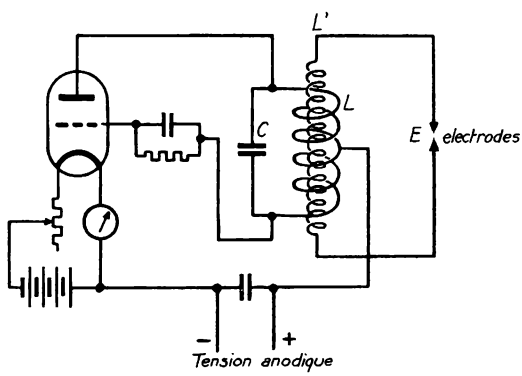


Fig. 41. - Montage électrique pour la production d'étincelles par ondes entretenues.

Le montage de la fig.41 comporte un tube émetteur de 500 Watts donnant des oscillations entretenues de fréquence comprise entre 1,5 et 7,5 mégacycles.

DISPOSITIFS DIVERS

Les électrodes sous forme de tiges, situées dans le prolongement l'une de l'autre, doivent pouvoir être déplacées dans leur ensemble, afin d'amener l'étincelle à une hauteur convenable et pouvoir séparément subir les mouvements de translation nécessaires au réglage de leur écartement. Pendant le fonctionnement, les différentes manoeuvres se feront sans risques si les supports des mâchoires de serrage sont isolés.

L'usure des électrodes est rapide quand on utilise des métaux volatils comme le cadmium; dans ce cas, pour des durées de fonctionnement longues et des étincelles puissantes, il est commode de donner aux électrodes la forme de disques dont les plans sont disposés à angle droit, animés d'un mouvement de rotation très lent (vitesse 2 tours à l'heure), l'étincelle est soufflée par 2 tuyères disposées comme il est indiqué figure 42.

On peut aussi, au lieu de disques, utiliser des barres à section carrée, disposées horizontalement à angle droit. Elles glissent lentement (25 cm. à l'heure) par entraînement mécanique dans deux gouttières isolantes en forme de V. L'étincelle jaillit entre les arêtes voisines à travers une petite ouverture pratiquée dans la gouttière supérieure; la surface de travail est ainsi renouvelée. La source de lumière, par suite de la permanence des conditions mécaniques et électriques, émet de façon constante; de plus, la puissance disponible dans chaque décharge peut être augmentée sans inconvénients; comme dans le dispositif précédent, l'étincelle est soufflée.

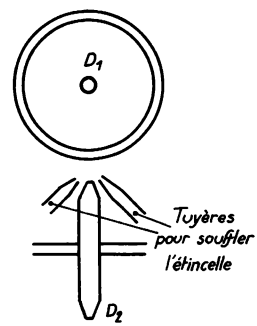


Fig. 42. - Electrodes tournantes soufflées.

Le spectre d'étincelles peut être obtenu encore à partir des sels d'un métal dont on imprègne deux électrodes de charbon ou à partir de poudres et de solutions.

Les raies de l'oxygène et de l'azote sont décelables aisément en cherchant les raies communes à deux spectrogrammes correspondant au corps étudié et à un autre élément; on choisit généralement le platine qui donne ces raies avec beaucoup d'intensité.

ÉTINCELLES SOUS L'EAU

Un moyen très simple d'obtenir un spectre continu, s'étendant depuis le visible jusqu'à la limite de transparence du quartz (2.000 Å environ), consiste à faire éclater de fortes étincelles sous l'eau entre électrodes métalliques : par exemple, aluminium, cuivre, tungstène. Sur le fond continu, on observe certaines raies caractéristiques du métal des électrodes, en émission aussi bien qu'en absorption.

En principe, les étincelles sont produites par la décharge à caractère oscillatoire d'un condensateur alimenté par un transfor-

mateur d'au moins 1 kVA. capable de donner au secondaire une tension de plusieurs milliers de volts (fig.43).

Les électrodes, de 8 à 10 millimètres de diamètre, distantes de quelques millimètres, sont contenues dans une cuve de 4 à 5 litres de capacité.

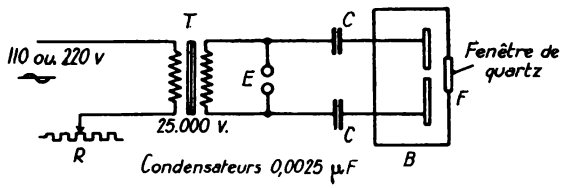


Fig. 43. - Production d'étincelles sous l'eau.

Le disque de silice, qui sert de fenêtre de sortie pour les radiations, doit être fixé solidement sur la paroi de la cuve et ne pas être trop mince. La distance séparant la fenêtre des électrodes ne doit pas être inférieure à 15 ou 20 mm. Il arrive fréquemment, si l'on a négligé de prendre ces précautions, que le disque soit arraché ou brisé par l'onde de choc se propageant dans l'eau au moment du passage de l'étincelle.

Les connexions entre les éléments du circuit seront aussi courtes que possible pour diminuer la self-induction; on utilisera des barres plates de cuivre puisque la fréquence du courant est élevée, de l'ordre de 500.000 à un million.

Le réglage s'effectue en agissant sur les distances explosives; la position des électrodes et des boules de l'éclateur sera modifiable au moyen de vis micrométriques.

Après un temps assez court de fonctionnement, l'eau est troublée par les particules métalliques arrachées aux électrodes pendant les décharges. Les pertes de lumière qu'elles occasionnent sont éliminées en renouvelant l'eau constamment par circulation.

ÉTINCELLES DANS LE VIDE

Dans un très bon vide, il est possible de faire éclater des étincelles entre deux électrodes métalliques. Il faut pour cela un champ électrique de 150 kilovolts par millimètre, lorsque la pression est de l'ordre de 10^{-3} barye. Le spectre obtenu n'est pas le même que dans l'air, les raies de l'oxygène et de l'azote sont évidemment absentes et les raies diffuses deviennent nettes. De plus, il s'étend très loin dans le domaine de l'extrême ultraviolet jusque vers 100 Å, avec un grand nombre de raies. Les atomes sont amenés à des degrés élevés d'ionisation sans qu'il y ait de possibilité d'absorption des radiations émises par l'atmosphère environnante.

Le dispositif employé a déjà été rencontré. Les fortes décharges condensées, données par un condensateur chargé à haute tension (jusqu'à 100.000 volts), passent directement entre les

électrodes métalliques très voisines, leur distance réglable étant de quelques dizièmes de millimètres. Pour cela, il est commode d'utiliser une tige filetée soigneusement au pas de 1/2 mm. se vissant dans un écrou de 5 cm. de longueur, le filetage étant légèrement enduit d'une graisse à vide.

Les électrodes sont fixées à l'extrémité de tubes de cuivre refroidis par circulation d'eau. Ils sont soudés à des bras de cuivre terminés par des rodages coniques qui viennent s'emmancher dans deux tubulures dont les axes confondus passent par le centre d'un ballon de pyrex d'une vingtaine de centimètres de diamètre.

La ballon possède encore une ou deux autres tubulures perpendiculaires aux précédentes, terminées par des rodages plans sur lesquels sont scellées des fenêtres planes transparentes convenables. Dans le cas de l'utilisation de l'extrême ultra-violet, une tubulure n'est pas obturée, elle est en relation par exemple avec la fente d'un spectrographe placé dans le vide. La distance séparant la fente de l'étincelle est petite : 2 à 3 cm. au plus.

La pression dans l'enceinte doit être de l'ordre de 10^{-4} mm. de mercure. Les pompes à diffusion d'huile de grand débit fonctionnent pendant la durée des expériences pour évacuer les gaz occlus libérés par les électrodes. Ils empêcheraient l'observation des radiations de courte longueur d'onde qu'ils absorbent, en même temps que leurs raies se superposent à celles du métal étudié. Les premières décharges illuminent le volume entier du ballon. On évite ces inconvénients, soit en dégazant les électrodes dans l'appareil sous vide par chauffage en haute fréquence, soit en les soumettant à de courtes séries de décharges suivies d'arrêts suffisamment longs pour rétablir un vide excellent. Les électrodes sont dans les conditions favorables à un bon fonctionnement lorsque les lueurs n'apparaissent plus au moment du passage de l'étincelle.

La cadence des décharges ne doit pas être trop rapide pour que les gaz qui sont toujours libérés en petite quantité par la suite puissent être éliminés rapidement. L'expérience permet de régler le rythme des étincelles au moyen d'un commutateur tournant qui ferme le primaire du transformateur. La cadence est limitée en particulier par le temps de charge du condensateur.

On ne dépasse guère quelques étincelles par seconde. Au cours du fonctionnement, le métal des électrodes est vaporisé. Il arrive que la vapeur soit projetée violemment sur la fente du spectrographe et se condense sur les parois du ballon; leur usure empêcherait le passage des étincelles si l'on ne pouvait régler leur distance en cours de fonctionnement.

Il faut noter que, dans ces conditions, il y a émission de rayons X.

Le même dispositif peut servir à une pression de quelques millimètres de mercure pour certains gaz comme l'hydrogène, l'azote, l'hélium qui sont encore très transparents vers 1.000 Å. Lorsque la décharge éclate dans une enceinte au voisinage d'une fenêtre transparente (fluorine), il y a intérêt à faire circuler le gaz, l'arrivée se trouvant au voisinage de celle-ci pour éviter son obscurcissement par la pulvérisation des électrodes.

Lampes pour la région de Schumann. - Lorsqu'on n'a pas besoin d'un fond continu, il est facile de réaliser une lampe donnant dans la région comprise entre 2.400 et 1.250 Å un spectre extrêmement riche en raies avec une lampe analogue à celle de la fig.44.

On fait éclater entre deux électrodes de tungstène directement soudées à l'ampoule de pyrex et distantes de 1 mm. une étincelle condensée dans l'azote pur. Ce gaz a, dans ce domaine, une absorption négligeable. L'ampoule est fermée par une fenêtre mince de fluorine.

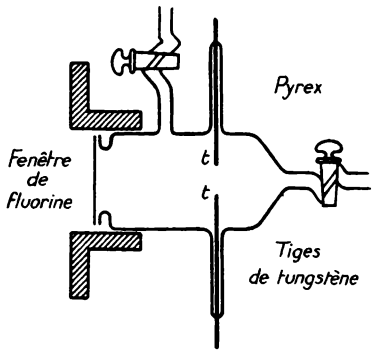


Fig. 44. - Lampe pour la région de Schuman.

L'utilisation de l'azote au lieu de l'hydrogène permet des manipulations plus commodes.

Lampes à hélium. - Hopfield, en étudiant la décharge moyennement condensée dans l'hélium, a découvert l'existence d'un spectre continu émis avec beaucoup d'intensité dans la région comprise entre 500 et 1.100 Å environ, qui est d'origine moléculaire. Le tube comporte un capillaire comme dans les sources de Lyman décrites ci-après.

SOURCES DE LYMAN

Lyman a utilisé un autre dispositif qui consiste à faire passer la décharge à travers un tube capillaire en verre. On a ainsi, comme dans les tubes de Geissler, une brillance maximum et une absorption moindre des radiations par le gaz dans lequel s'effectue la décharge; il est facile en effet de placer le capillaire au voisinage de la fente du spectrographe. Lorsque l'alimentation est faite en courant continu, les résultats sont meilleurs en reliant l'électrode la plus proche de la fente au pôle négatif.

L'utilisation de l'étincelle condensée traversant un capillaire lui a permis en émission, d'observer l'apparition d'un fond continu de 1.900 à 900 Å, d'autres expérimentateurs l'ont étendu jusqu'à 270 Å. Ces radiations sont dues aux particules de verre du capillaire qui sont arrachées et portées à très haute température par la décharge.

La figure 45 représente un tel montage. Les extrêmités en forme de cône des électrodes d'aluminium sont rodées et scellées à la picéine sur le tube de décharge. Elles sont refroidies par circulation d'eau.

Le capillaire de 35 mm. de longueur a 1 mm. de diamètre intérieur et 7 à 8 mm. de diamètre extérieur. Il est logé dans un tube de pyrex où il entre à frottement doux, il est muni d'une gorge dans laquelle on place de la laine de verre pour éviter que la décharge passe autour de lui.

La fente du spectrographe est protégée par une série de trois ouvertures, sinon, pendant le fonctionnement, les particules de

verre arrachées au capillaire viendraient l'obstruer; l'usure est très rapide, en deux heures de fonctionnement le diamètre devient trois fois plus grand environ, bien que la cadence des décharges ne dépasse pas 2 à 3 par seconde.

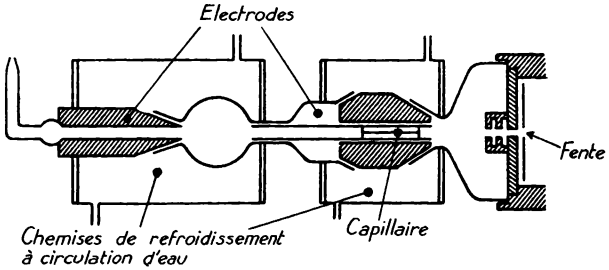


Fig. 45. - Lampe du type Lyman avec capillaire.

L'axe du capillaire doit évidemment passer par la fente du spectrographe. L'alignement est vérifié en regardant la fente éclairée à travers le capillaire. L'extrêmité de l'appareil comporte un rodage plan perpendiculaire à l'axe du tube, il vient s'appliquer sur un rebord assez large pour corriger les défauts de centrage.

Il est nécessaire de chauffer le capillaire avant le passage de la première décharge, sinon, il se brise assez fréquemment.

Les deux électrodes peuvent aussi être situées de part et d'autre du capillaire; celle qui est placée près de la fente du spectrographe laisse passer les radiations par une petite ouverture cylindrique (3mm. de diamètre) pratiquée dans la masse .

Le dispositif a encore été amélioré de la manière suivante : le capillaire est en silice, ce qui diminue les risques de rupture. Une des électrodes est refroidie par circulation d'eau; l'autre, voisine de la fente, porte des ailettes qui suffisent au refroidissement et en même temps recueillent les poussières de silice qui sont chargées électriquement. De l'hélium sous une pression de 2 mm. circule dans l'appareil : il est débarrassé des vapeurs absorbantes par passage à travers un piège à air liquide.

Il faut environ une heure pour obtenir le noircissement de la plaque.

Dans tous ces appareils, où il est nécessaire d'avoir des gaz purs choisis pour leur transparence dans un domaine déterminé, il faut diminuer le plus possible la quantité des gaz occlus des électrodes, par exemple en utilisant du métal fondu dans le vide.

•

• •

PROCÉDÉS TECHNIQUES

Nous donnerons ici quelques procédés techniques spécialement reliés à la construction des sources de lumière, mais pouvant aussi trouver leur application dans de nombreux autres domaines de la physique.

INTRODUCTION D'UN GAZ OU D'UNE VAPEUR DANS UN RÉCIPIENT PRÉALABLEMENT VIDÉ

POMPE DE TOEPLER

La pompe de Toepler, représentée figure 46, est souvent utilisée pour introduire un gaz déjà purifié dans un récipient, sous une pression connue.

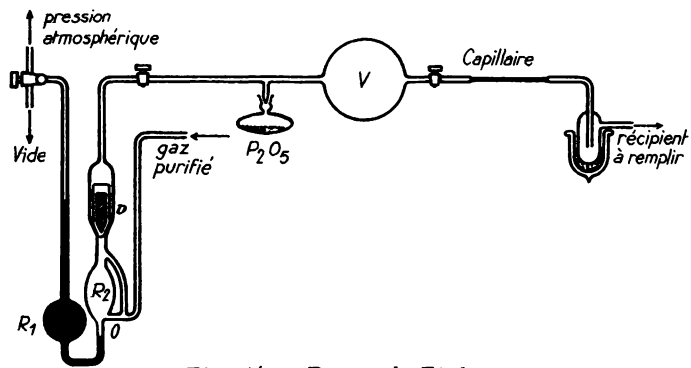


Fig. 46. - Pompe de Töpler.

En faisant le vide dans le réservoir R_1, le mercure qu'il contient s'élève et démasque l'orifice O. Le gaz est alors admis à pénétrer dans le volume R_2. La pression atmosphérique est ensuite rétablie dans R_1 et le mercure comprime le gaz emprisonné, qui s'échappe vers V en soulevant la valve v. Elle est constituée par un tube de verre à paroi épaisse, complètement fermé, qui contient un morceau de fer ou de plomb pour l'alourdir. L'étanchéité est assurée en rodant l'extrémité du tube sur son siège. On arrête la montée du mercure lorsque la valve est complètement noyée. On vide à nouveau R_1 pour faire descendre le mercure, la communication est ainsi interrompue grâce à la valve et au joint de mercure qui l'environne.

On recommence au besoin l'opération plusieurs fois pour augmenter la pression de remplissage de la capacité V.

De là, le gaz est dirigé vers l'appareil à remplir à travers un tube capillaire, pour régler aisément le débit. Un piège à air liquide est chargé de condenser en particulier la vapeur de mercure.

HYDROGÈNE

1° Par diffusion.

Le platine et le palladium chauffés sont perméables à l'hydrogène. Le débit croît avec la température; la diffusion est sensible dès 400° pour le platine et dès 250° pour le palladium. La vitesse de diffusion dépend encore de l'épaisseur traversée et de la différence des pressions du gaz hydrogène de part et d'autre du métal.

L'introduction d'hydrogène très pur, sous une pression déterminée, dans un récipient préalablement vidé, se fait facilement en mettant à profit cette propriété. Un petit cylindre creux de platine à parois minces, fermé à une extrémité, est soudé à l'autre à un tube de verre convenable (voir le chapitre "Soufflage du verre") qui est relié au besoin au reste de l'appareil de verre par l'intermédiaire de "passages" permettant la soudure de verres de nature différente. Dans le cas du palladium, l'extrêmité ouverte du petit cylindre est en platine pour rendre possible la soudure verre-métal. L'embout de platine est lui-même soudé au palladium.

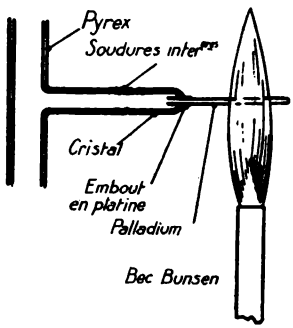


Fig. 47. - Osmo-régulateur à flamme.

De toutes façons, il suffit de chauffer l'extrêmité fermée du tube métallique avec la flamme d'un bec Bunsen, pour que l'hydrogène contenu dans la flamme commence à diffuser à travers le métal (fig. 47). Le débit est faible, on peut donc régler commodément la pression.

On peut également procéder au remplissage par chauffage électrique du tube dans une atmosphère d'hydrogène comme l'indique la figure 48. Lorsque la pression du gaz admis dans

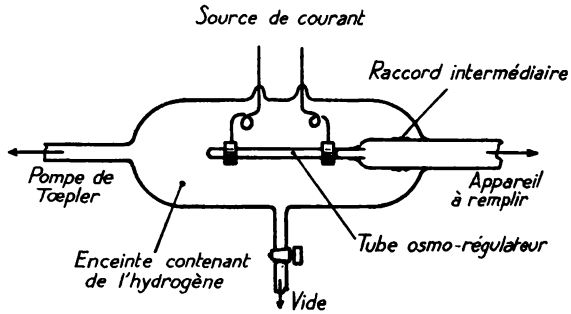


Fig. 48. - Osmo-régulateur à chauffage électrique.

l'appareil est trop élevée, il est possible de faire passer l'hydrogène en sens inverse du récipient dans l'enceinte alors vidée (ou dans l'atmosphère si l'on utilise le dispositif de la figure 47; dans ce cas, le tube est chauffé par l'intermédiaire d'un petit four électrique).

Il est commode, pour chauffer le tube de palladium ou de platine, de le faire traverser directement par le courant électrique.

A 500°, un tube dont les parois ont 1 mm. d'épaisseur et une surface de 1 cm^2, plongé dans une atmosphère d'hydrogène à la pression de 15 mm., est traversé, chaque seconde, par une certaine quantité de gaz, dont le volume, mesuré dans les conditions normales de température et de pression, est de l'ordre de 3 mm^3. Le débit reste suffisamment constant pendant un grand intervalle de temps si l'enceinte contenant le gaz a un grand volume.

2° Par électrolyse.

Dans certaines expériences, le débit de gaz ainsi réalisé peut être insuffisant. On obtient de l'hydrogène pur de façon continue, en quantités plus importantes, par décomposition électrolytique de l'eau de baryte ou d'une solution de soude pure dont la concentration est comprise entre 15 et 30%. Le gaz formé est pur, à condition d'empêcher la diffusion de l'oxygène, plus ou moins ozonisé, prenant naissance au pôle positif, par un diaphragme entourant l'électrode négative. Un autre procédé consiste à placer une électrode auxiliaire réunie à l'électrode négative par une résistance de quelques milliers d'ohms. Elle devient productrice d'hydrogène et interdit la diffusion. La figure 49 représente un électrolyseur conçu suivant ce principe.

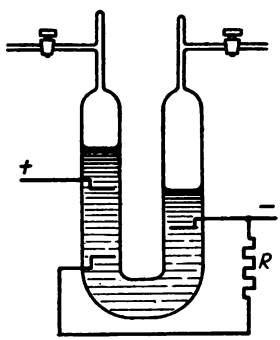


Fig. 49. - Production par électrolyse d'hydrogène et d'oxygène purs.

GAZ RARES

Les températures d'ébullition sous la pression normale de ces gaz sont données dans le tableau suivant :

Hélium	Néon	Argon	Krypton	Xénon
- 269°	-246°	- 186°	- 151°	- 107°

Les gaz rares vendus dans le commerce sont dans un état de pureté assez grand. La purification de l'hélium et du néon (et aussi de l'hydrogène) a lieu au cours de passages réitérés à travers un piège plongeant dans l'azote liquide. La circulation forcée du gaz est réalisée au moyen d'une pompe de Toepler. Le piège est rempli de charbon de noix de coco. Ce dernier doit avoir subi au préalable un dégazage poussé, par chauffage dans un vide excellent pendant plusieurs heures à la température la plus élevée que puisse soutenir le verre du piège sans se ramollir. L'hélium, l'hydrogène et le néon sont à peine absorbés par le charbon actif; les gaz ordinaires et les autres gaz rares, par contre, le sont en totalité.

Un procédé qui est valable pour éliminer tous les gaz, sauf les gaz rares, consiste à vaporiser l'un quelconque des métaux alcalino-terreux dans l'atmosphère gazeuse. Par exemple, on obtient un vide de l'ordre de 10^{-7} mm. de mercure dans un réci-

pient rempli d'air à la pression atmosphérique en vaporisant un morceau de calcium, ou mieux de baryum, contenu dans un tube latéral. Il reste de l'argon à 99,7% de pureté, les impuretés étant le néon et l'hélium.

Le cérium, ou plutôt l'alliage des différentes terres rares appelé misch-métal, et le thorium, portés au rouge, agissent de la même façon, mais plus activement encore. On fera éclater par exemple un arc puissant entre deux électrodes de métal plongées dans le gaz à purifier.

Quand on a besoin de petites quantités d'hélium extrêmement pur, il suffit de porter à haute température (1.000° environ) dans le vide, les minerais finement pulvérisés de terres rares : monazite, thorianite. Chaque gramme de minerai libère plusieurs centimètres cubes d'hélium. Le gaz recueilli est ensuite purifié comme il a été dit ci-dessus.

L'hélium et le néon ne diffusent pas à travers les métaux, mais la silice chauffée vers 1.000° devient perméable. La pression de ces gaz, contenus dans un appareil de silice fondue chauffé à température élevée, diminue progressivement. Inversement d'ailleurs, un récipient de silice vidé et chauffé dans l'air, se remplit très lentement de néon et d'hélium.

OXYGÈNE

L'appareil déjà décrit pour produire de l'hydrogène pur par électrolyse, est utilisable en prenant toutes dispositions pour éviter la diffusion de l'hydrogène vers l'anode.

Il est également simple d'introduire de l'oxygène pur dans une enceinte vidée par décomposition thermique de l'oxyde mercurique HgO. La scission de la molécule a lieu vers 360°. Les deux variétés d'oxyde jaune et rouge conviennent. La substance doit être bien pulvérisée, pour augmenter la vitesse de décomposition, et desséchée. La vapeur de mercure produite simultanément est, si cela est nécessaire, condensée dans un piège à air liquide.

L'argent est perméable à l'oxygène; il est simple, pour introduire ce gaz en petite quantité dans un récipient, d'utiliser un appareil analogue à celui qui a été décrit à propos de l'hydrogène. Le tube doit avoir des parois très minces; il est soudé au verre par l'intermédiaire d'un petit cylindre de platine ou de cuivre; ces derniers sont eux-mêmes soudés à l'argent très facilement sous une couche de borax et d'anhydride borique, en employant une soudure contenant 45% d'argent, 30% de cuivre, 25% de zinc, dont le point de fusion est un peu supérieur à 700°.

Le débit de gaz est beaucoup plus petit, dans les mêmes conditions, que celui de l'hydrogène à travers le palladium.

AZOTE

La décomposition thermique des azotures métalliques se produit brutalement au delà d'une certaine température caractéristique de chacun d'eux. Elle s'effectue par rupture de la molécule

en ses deux constituants azote et métal. La technique de ce procédé simple de préparation sera décrite plus loin à propos des métaux alcalins.

Dans une autre méthode plus longue et qui nécessite un appareillage compliqué, on prépare l'azote par oxydation de l'ammoniac au moyen de brome :

$$8\ NH_3 + 3\ Br_2 \longrightarrow N_2 + 6\ NH_4Br.$$

L'appareil producteur d'azote (fig. 50) est d'abord rempli complètement d'eau distillée jusqu'au robinet R pour éliminer l'air; on fait monter par aspiration le liquide dans le tube à brome au-

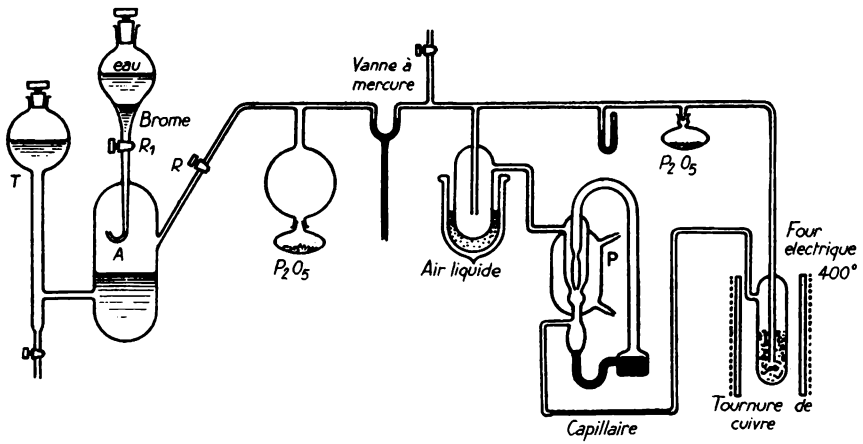


Fig. 50. - Préparation d'azote pur.

dessus du robinet R que l'on ferme. On verse dans le tube T une solution concentrée de gaz ammoniac pur. Le brome, placé dans l'entonnoir, est admis à tomber lentement dans la solution. Le gaz, accumulé en A, passe ensuite dans l'enceinte vidée, où il séjourne plusieurs jours en présence d'anhydride phosphorique, qui absorbe complètement la vapeur d'eau et le gaz ammoniac.

De là, par le jeu de la vanne à mercure, il est admis dans l'appareil de purification bien vidé. La pompe à diffusion de mercure P provoque une circulation continue du gaz (à condition que la pression du gaz soit inférieure à la pression d'amorçage de la pompe, toujours plus petite que 1 cm.) dont la vitesse est limitée par la présence du tube capillaire. L'oxygène, qui peut être présent si les bulles d'air n'ont pas été chassées complétement de

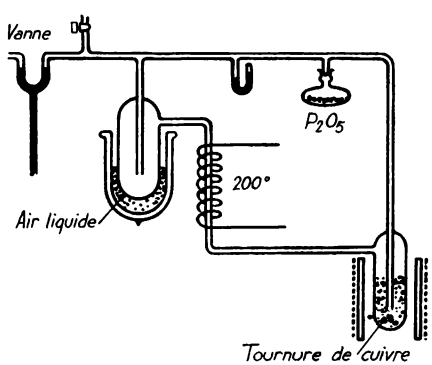


Fig. 51. - Variante du montage précédent.

l'appareil, est absorbé par la tournure de cuivre chauffée vers 400°. La circulation est maintenue pendant une dizaine d'heures. Elle peut être rendue automatique en chauffant modérément un des tubes verticaux (fig.51).

L'azote diffuse lentement à travers le fer, le chrome, le molybdène. Cette propriété peut être mise à profit pour faire pénétrer de petites quantités de ce gaz dans un appareil. Voir ce qui a été dit à ce sujet sur l'hydrogène et l'oxygène.

HALOGÈNES

Par suite de leur affinité chimique considérable, il est préférable de préparer les halogènes dans l'enceinte même à remplir par dissociation thermique du chlorure ou du bromure d'or. Ils se décomposent, le premier vers 300° et le second vers 150°. Le chlore et le brome se condensent facilement dans un piège à air liquide; ce dernier peut servir à protéger les pompes à vide (la tension de vapeur du chlore solide à - 154° est encore de 0,0015 mm. de mercure; celle du brome est négligeable).

Les cristaux d'iode sont introduits directement dans les appareils sans précautions spéciales.

MÉTAUX ALCALINS

Température de fusion :

Lithium : 180° (attaque fortement le verre).

Sodium : 98°.

Potassium : 63°5.

Rubidium : 39°.

Coesium : 28°5.

1° Utilisation des métaux : les métaux alcalins contiennent une grande quantité de gaz occlus, surtout de l'hydrogène. ils sont conservés généralement dans l'huile ou le pétrole. Lorsque le métal est fondu sans précaution dans le vide, les gaz occlus se dégagent brusquement et projettent des goutellettes dans toutes les directions. Les traces d'huile présentes, peu volatiles, distillent avec le métal.

La première opération consistera à éliminer la plus grande partie de cette huile en faisant séjourner le métal (sodium ou potassium) dans du benzène sec (benzène contenant du chlorure de calcium anhydre).

Le morceau que l'on veut distiller est introduit rapidement avec des pinces dans le tube représenté figure 52. L'opération est facile pour le sodium; le potassium s'enflamme souvent à l'air, il est prudent de se placer dans une atmosphère inerte. Le tube, d'environ 30 mm. de diamètre, est relié à l'installation à vide; il est chauffé ensuite, d'abord à une température un peu inférieure à celle du point de fusion pour chasser une partie des gaz occlus,

puis à une température légèrement supérieure. On arrête le chauffage au moment où l'écorce d'oxyde qui enrobe le métal commence à s'ouvrir; les gaz se dégagent alors assez rapidement. En chauffant à nouveau avec précaution, la distillation commence sans projection. Le petit tube, relié à la partie inférieure du tube vertical par un long étranglement, est chauffé en même temps pour éviter que le métal ne s'y condense. La condensation a lieu sur les parois supérieures du tube. On ramène facilement le métal à la partie inférieure (qui est alors refroidie par un courant d'air ou en la plongeant dans l'eau) après avoir chassé vers la pompe les têtes de la distillation contenant des traces d'huile. Le processus est recommencé plusieurs fois tout en contrôlant le degré de vide.

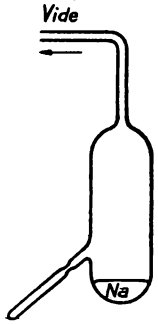


Fig. 52. - Distillation simple d'un métal alcalin.

Lorsque la pression reste inférieure à 10^{-5} mm., le petit tube latéral est refroidi, de façon à ce que la vapeur métallique vienne s'y condenser. L'étranglement est chauffé progressivement, puis scellé; le petit tube est alors séparé du tube vertical, il contient le métal purifié qui sera introduit dans l'appareil définitif.

Cette ampoule scellée est mise en place (fig.53); elle est ouverte dans le vide par le choc d'un cylindre de fer enfermé dans un tube de verre à paroi épaisse et entraîné par le champ magnétique d'une bobine, déplaçable le long du tube horizontal.

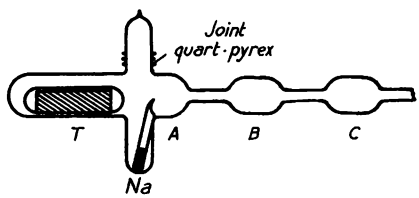


Fig. 53. - Montage pour l'introduction d'un métal alcalin très pur.

Par distillations successives, le métal est amené dans l'appareil; on facilite la condensation en créant une paroi froide au moyen d'une bande de papier filtre mouillée.

2° Utilisation des azotures. - Les azotures métalliques sont décomposables thermiquement à température peu élevée en général. La décomposition est assez lente tant qu'on ne dépasse pas une température déterminée; au delà, elle a une allure explosive.

Voici, d'après Tiede, les intervalles de température convenables pour les différents azotures.

Azoture de	sodium	: 280 à 330°
-	potassium	: 260 à 320°
-	rubidium	: 260 à 310°
-	coesium	: 290 à 350°
-	calcium	: 100 à 110°
-	strontium	: 110 à 140°
-	baryum	: 120 à 160°

L'azoture sec est étalé en couche mince dans un tube (fig.54); le vide étant fait, on provoque la décomposition lente localement, de proche en proche, de A vers B. Le tube vertical, relié au récipient qui doit recevoir le métal pur, est obturé par un bouchon de toile métallique à mailles fines, dont le rôle est d'arrêter les cristaux qui pourraient être projetés. Le métal condensé enfin en C subit, après séparation du tube du reste de l'appareil, plusieurs distillations successives.

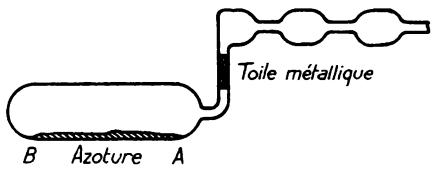


Fig. 54. - Décomposition d'un azoture pour obtenir un métal alcalin ou de l'azote.

Ce procédé permet également d'introduire dans un appareil de l'azote très pur.

3° Utilisation des chlorures. -La méthode générale de préparation des métaux alcalins peut être utilisée pour produire de petites quantités de métal. Elle consiste à déplacer le métal alcalin de son chlorure au moyen du calcium. La technique du procédé a été décrite par Hackspill.

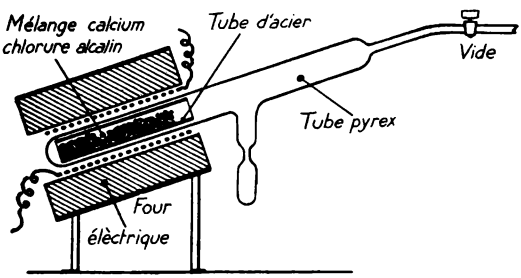


Fig. 55. - Préparation d'un métal alcalin à partir de chlorure.

La réaction est effectuée à température élevée dans le vide (fig.55). Le chlorure alcalin est désséché complètement par fusion, puis pulvérisé rapidement avant de le mélanger à des morceaux de calcium, purifié autant que possible au préalable par fusion dans le vide. La quantité de calcium est environ deux à trois fois la quantité théorique. Le mélange est introduit dans une éprouvette de fer d'une dizaine de centimètres de longueur. On la glisse dans un tube de verre pyrex dont le diamètre diffère peu de celui de l'éprouvette (jeu de 1 à 2 mm.). L'appareil est alors soudé à la canalisation à vide, puis chauffé électriquement dans le four seulement sur une longueur inférieure à celle du tube de fer.

L'élévation de température doit être très progressive, de façon à purger totalement les produits de la réaction des gaz dégagés. Elle est poursuivie jusque vers 600 à 700°. Le verre s'écrase sous l'action de la pression atmosphérique sur l'éprouvette de fer sans autre inconvénient. Le métal alcalin distille et va se condenser dans l'ampoule qu'il suffira de sceller. Il contient

un peu de calcium, qu'il est facile d'éliminer ultérieurement par de nouvelles distillations sous vide, effectuées à températures peu élevées, étant donnée la différence considérable des tensions de vapeur des deux métaux (par exemple, à 475° la pression de vapeur de sodium est d'environ 2 mm. de mercure, celle du calcium est de l'ordre de 10^{-5} mm).

4° Electrolyse. - L'étude de la conductibilité du verre en fonction de la température, a conduit Warburg à réaliser l'électrolyse du verre à température inférieure à celle du point de fusion. Sous l'influence d'un champ électrique, les ions sodium du verre se mettent en mouvement. Utilisant ces résultats, Burt a décrit un montage qui permet d'introduire le métal alcalin dans une ampoule de verre sous vide (fig. 56). Comme ampoule, il convient de choisir une lampe d'éclairage à filament de tungstène assez gros (lampe auto par exemple). On l'ouvre et on soude un tube latéralement pour la relier à la canalisation à vide et au récipient dans lequel le métal doit être utilisé.

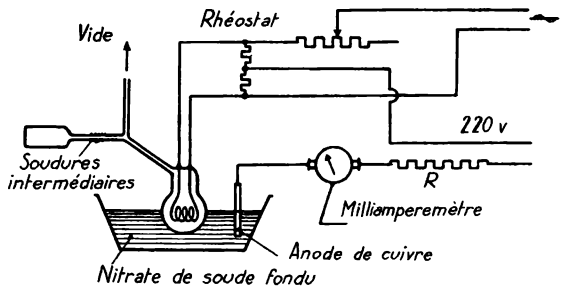


Fig. 56. - Préparation de sodium pur par électrolyse du verre.

L'ampoule est partiellement plongée dans un bain de nitrate de soude fondu qui constitue l'anode. Les électrons émis par le filament, chauffé au moyen d'une source de courant alternatif, se dirigent vers l'enveloppe de verre, où ils neutralisent les ions sodium qui se sont déplacés vers la surface interne du verre sous l'action du même champ. Le métal distille au fur et à mesure de sa production et va se déposer sur les parois supérieures refroidies par un courant d'air.

Le champ, qui déplace les électrons et les ions en sens inverse, est établi entre le point milieu du filament, relié au pôle négatif de la batterie de 220 volts, et le bain de nitrate relié au pôle positif.

La résistance R de quelques milliers d'ohms limite le courant qui pourrait devenir très intense et par suite, détruirait le filament, si un régime de décharge se produisait dans la vapeur métallique à la suite d'un refroidissement défectueux de l'ampoule. Le rhéostat maintient le courant de chauffage du filament à sa valeur normale.

Le même procédé réalisé avec des lampes en verre au potassium sans sodium et un bain de nitrate de potasse fondu donne du potassium très pur.

AUTRES MÉTAUX

Les métaux contiennent toujours une grande quantité de gaz occlus (oxyde de carbone, gaz carbonique, azote, hydrogène, vapeur d'eau). De plus, les vapeurs de mercure généralement présentes dans l'atmosphère des laboratoires, forment, avec la plupart d'entre eux, des amalgames. Pour ces raisons, il est nécessaire, pour les purifier, de les soumettre dans le vide, soit à un chauffage prolongé à température élevée s'ils sont peu volatils, soit à une distillation dans le cas contraire.

Avant tout autre traitement, il est nécessaire d'éliminer les traces de graisse par lavage dans l'éther ou le benzène. Le métal est transporté avec des pinces dans une étuve, puis dans le récipient où il sera dégazé sous vide poussé par chauffage. Si l'échantillon est oxydé, l'oxyde peut être réduit par dissociation quand la température atteinte est telle que la tension de dissociation soit grande par rapport à celle de la vapeur métallique. On chauffe souvent le métal en atmosphère d'hydrogène dans le même but. On termine, dans ce cas, par un dégazage prolongé dans un vide élevé pour chasser l'hydrogène absorbé.

Il est difficile de chasser complètement les gaz occlus dans une substance à l'état solide, car la diffusion se fait très lentement, aussi la fusion dans le vide de l'échantillon est souhaitable chaque fois qu'elle est possible.

Les métaux peuvent être portés aux températures élevées nécessaires dans l'appareil même, en le plaçant dans un champ électromagnétique variable de haute fréquence.

Une autre méthode très efficace consiste à utiliser l'échantillon de métal en feuille mince comme cathode d'un tube à décharge. Il faut alors disposer de tensions élevées, supérieures à 5.000 volts.

Le dégazage est très important, bien que la température du métal augmente peu. On gagne encore en efficacité en chauffant en même temps l'échantillon. Cette méthode est particulièrement intéressante quand on doit construire un tube à décharge; après avoir fait le vide, on remplira l'appareil du gaz choisi sous quelques millimètres de pression, puis, après un certain temps de fonctionnement, on recommencera le cycle des opérations : évacuation, remplissage, décharge intense, autant de fois qu'il sera nécessaire pour qu'un examen spectroscopique ne révèle pas de gaz étrangers.

Les électrons produisent des effets thermiques importants lorsqu'ils viennent heurter une surface; ce mode de chauffage est simple, il est décrit au chapitre "Hautes températures".

Il ne faut pas oublier que le dégazage est indispensable pour une bonne adhérence dans les soudures verre-métal.

Les métaux suivants : mercure, cadmium, zinc, thallium, dont la tension de vapeur est notable aux températures modérées, peuvent être introduits dans l'appareil par distillations successives, en éliminant les têtes de distillation; la technique est identique à celle indiquée pour les métaux alcalins.

Le mercure, avant d'être utilisé, doit en général être purifié suivant la méthode décrite au chapitre III : "Technique du vide".

Métal	Point de fusion	Pression de vapeur	
		0,001 mm. à	1 mm. à
Hg	- 38°9	17°	126°
Tl	302°	413°	748°
Cd	320°9	219,1	392,2
Zn	419°4	296,3	487,7

SOUDURE ÉLECTRIQUE PAR POINTS

Les fils de tungstène et de molybdène se soudent bien aux verres peu fusibles comme le pyrex, les coefficients de dilatation étant très voisins.

Le tungstène, dont l'emploi est très général, est cassant; on est amené à en augmenter la longueur, qui est presque limitée à la traversée du verre, par soudure avec un fil métallique moins fragile.

Le nickel se soude électriquement avec facilité au tungstène et au molybdène; il sert souvent d'intermédiaire entre ces métaux et d'autres plus fusibles.

La soudure électrique par points peut se faire simplement au laboratoire au moyen d'un arc à courant continu. On opère en atmosphère réductrice pour éviter l'oxydation des pièces préalablement nettoyées. Quand il s'agit de pièces de petites dimensio

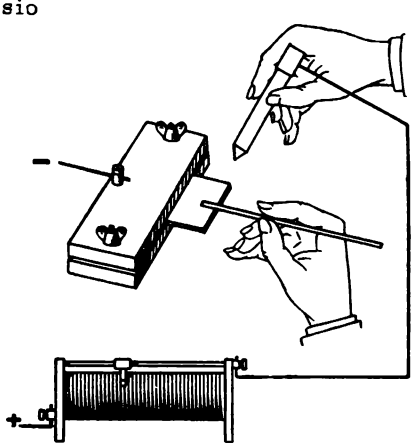


Fig. 57. - Soudure de métaux à l'arc.

sions, l'atmosphère réductrice peut être, soit la flamme éclairante d'un bec Bunsen, soit le gaz d'éclairage ou l'hydrogène.

Une des pièces à souder (fig. 57) est serrée dans une pince réunie au pôle négatif d'une batterie. L'autre est simplement fixée sur la première dans la position convenable. La soudure est obtenue en établissant l'arc entre les deux pièces et un charbon de lampe à arc, relié au pôle positif par l'intermédiaire d'un rhéostat. La résistance est réglée par tâtonnements à la valeur convenable.

Les soudeuses électriques du commerce, vendues pour les usages de la prothèse dentaire, conviennent très bien pour monter

les différents appareils de laboratoire. Voici quelques indications pour réaliser une telle machine (fig.58). Le secondaire d'un transformateur de 2 à 3 kVA de puissance (suffisante pour des points de soudure d'environ 1 cm) comporte 3 à 4 spires seulement. Elles sont formées par du câble de cuivre de 2 cm. de diamètre ou du ruban de cuivre très large. Les extrémités sont réunies respectivement à 2 électrodes cylindriques de cuivre terminées en tronc de cône. L'une est fixe, l'autre mobile : elles viennent pincer fortement les pièces à souder lorsqu'on appuie sur la pédale. Quand celle-ci est poussée à fond, le primaire est alimenté, le courant intense passe brusquement dans le secondaire; la puissance est réglable au moyen d'un rhéostat ou d'une self à fer, en série avec le primaire du transformateur. (fig.58).

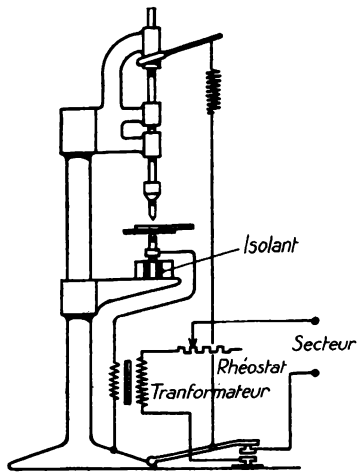


Fig. 58. - Réalisation pratique d'une soudeuse électrique par points.

Les facteurs sur lesquels on peut agir et qui interviennent dans la soudure sont la pression des électrodes, le temps de passage du courant et la puissance disponible au secondaire.

La pression définit la résistance initiale au contact des 2 masses métalliques, dans le cas des métaux très conducteurs, il convient d'opérer à faible pression; dans celui des métaux à grande résistance électrique spécifique, la pression doit être plus élevée; elle ne dépasse jamais quelques kilogrammes par millimètre carré. La pression à exercer dépend encore de l'état de propreté des surfaces.

L'énergie disponible au secondaire, qui se retrouve à peu près sous forme calorifique $\int Ri^2dt$, doit pouvoir être réglée suivant la nature et les dimensions des pièces à souder.

Le temps de soudure ne doit pas être trop grand : une seconde est une limite à ne pas dépasser; il varie évidemment en sens inverse de la résistance spécifique des métaux et de l'épaisseur des pièces.

On peut utiliser comme bâti de la machine à souder une perçeuse sensitive. L'électrode mobile de cuivre est serrée dans le mandrin porte-foret, l'autre électrode isolée de la masse par du carton d'amiante est fixée sur le plateau ou dans les mâchoires de l'étau qui fait partie généralement de la perçeuse.

Le levier est réuni, au moyen d'un ressort et d'une chaîne, à la pédale dont le mouvement commande le rapprochement des électrodes et la fermeture du circuit primaire. Il suffit, pour adapter la pression, d'avoir à sa disposition un jeu de ressorts ou, pour un ressort donné, de faire varier son point de suspension le long de la chaîne.

LES FILTRES

ABSORPTION DES RADIATIONS LUMINEUSES

GÉNÉRALITÉS.

L'absorption de la lumière par un milieu matériel est un phénomène général. La transparence des différentes substances dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels il faut mentionner la nature et la concentration du milieu absorbant, son épaisseur et la longueur d'onde de la lumière incidente.

L'absorption peut être sélective, une région déterminée du domaine spectral étant fortement absorbée alors que, pour d'autres, la transmission est bonne.

La loi de Lambert permet de calculer la fraction de l'énergie lumineuse incidente absorbée par un milieu homogène d'épaisseur connue : I_0 et I désignant les intensités incidente et transmise d'un faisceau de lumière parallèle monochromatique qui traverse normalement une épaisseur d de la substance absorbante, on a : $I = I_0 e^{kd}$ (k est le coefficient d'absorption). Cette expression ne tient pas compte des pertes par réflexion sur les surfaces qui limitent le milieu.

Quand la substance absorbante est à l'état gazeux ou dissoute dans un solvant, le coefficient d'absorption k est proportionnel à la concentration : $k = ac$ et $I = I_0 e^{-acd}$. Cette loi, connue sous le nom de loi de Beer, n'est pas toujours vérifiée, en particulier dans le cas des électrolytes et aux grandes concentrations. Elle est naturellement en défaut lorsque des phénomènes photochimiques se produisent dans le milieu irradié.

On utilise souvent le coefficient d'extinction : c'est l'inverse de l'épaisseur du milieu considéré qui réduirait l'intensité au 1/10 de sa valeur initiale; par suite, si ε est ce coefficient, on a : $I = I_0 e^{-\varepsilon d}$

Dans les solutions ou dans les gaz, ε est proportionnel à la concentration : $\varepsilon = Ec$ et $I = I_0 . 10^{-Ecd}$

E est appelé coefficient d'extinction moléculaire lorsqu'on exprime la concentration en molécules gramme par litre.

On trouve encore dans la littérature le coefficient de transmission défini par $I = I_0 \alpha^d$.

TRANSMISSION DANS L'INFRAROUGE

Corps solides. - Nous allons passer en revue les corps solides les plus fréquemment utilisés au laboratoire.

Parmi eux, le verre est transparent pour une épaisseur de 1 cm. jusqu'à 2,5 μ ; en lames minces, la limite d'opacité est rejetée vers 4 μ.

L'absorption du quartz cristallisé est importante dans le proche infrarouge, il est opaque au delà de 3 μ et redevient transparent à partir de 50 μ; au début du spectre, la silice fondue serait un peu plus transparente mais, de toutes façons, les courbes de transmission des deux variétés diffèrent peu.

La fluorine a comme meilleur domaine d'utilisation celui qui s'étend de 2,5 à 8 μ; sous de faibles épaisseurs, on peut aller jusqu'à 10 μ. C'est une substance rare dont on trouve des échantillons souvent teintés, de propriétés optiques mal définies.

Les substances les plus transparentes dans le proche infrarouge sont les chlorures et bromures des métaux alcalins.

Le chlorure de sodium convient entre 8 et 16 μ; le chlorure de potassium jusqu'à 22 μ, longueur d'onde à partir de laquelle son opacité augmente rapidement. Il présente deux fortes bandes d'absorption vers 3 et 7 μ, ce qui limite son emploi dans le domaine compris entre 11 et 23 μ.

Les cristaux de bromure de potassium sont utilisables entre 18 et 28 μ; ceux d'iodure de potassium permettent d'aller jusqu'à 33 μ. Les surfaces des pièces optiques en sel gemme ou en sylvine, très hygroscopiques, sont souvent détériorées par l'humidité; on les protège par une couche très mince de collodion dont l'absorption n'intervient vraiment que pour des mesures absolues; elle se manifeste par des bandes entre 2 et 14 μ environ, mais sous forme de films de quelques microns d'épaisseur, il absorbe très peu (1% seulement à 23 μ).

De même, des films minces de nitro-cellulose (1 micron d'épaisseur), bien que présentant quelques bandes d'absorption, ont un coefficient de transmission supérieur à 80% tout le long du spectre infrarouge.

La paraffine à point de fusion élevé (70°) est opaque dans le proche infrarouge, sous des épaisseurs de 1,5 à 2 millimètres jusqu'à 8 μ environ; elle redevient alors transparente et, à partir de 20 μ, elle ne possède pas d'absorption gênante.

Le noir de fumée en couche mince a également une transparence qui croît progressivement pour les longueurs d'onde supérieures à quelques μ.

Le papier et le carton sont des absorbants du proche et de l'infrarouge moyen. Le papier noir sous une épaisseur de 1/10 de mm. est transparent à partir de 50 μ.

Un très grand nombre de couches absorbantes dans des domaines intéressants peuvent être obtenues par la méthode des poudres, éliminant facilement le visible et le proche infra-rouge. La substance en poudre fine est étalée en couche mince sur un support transparent ou déposée sur le support par condensation de fumées (oxydes métalliques) ou distillation de vapeurs. L'épaisseur du dépôt et la grosseur des particules interviennent dans la transmission. (voir Chapitre : Piles thermoélectriques).

Liquides. - L'eau est très opaque sous une épaisseur de 1 cm. La transmission s'arrête totalement à 1,4 μ; en couches minces de

l'ordre de 1/100 de mm. d'épaisseur, on observe des bandes d'absorption vers 1,5 μ, 2,3 μ, 4,75 μ et 6 μ.

Le sulfure de carbone utilisé dans le visible à cause de sa réfringence, a une transparence voisine de celle de l'eau, limitée à 1,5 μ.

Les solutions aqueuses de sels de cuivre sont très opaques pour l'infrarouge; à partir de 0,8 μ, la transparence d'une solution de chlorure à 3% est presque nulle. La solution suivante est tout à fait excellente pour arrêter l'infrarouge : chlorure de cuivre 60 g., bichromate de potassium 1,9 g., sulfate d'ammoniaque et de cobalt 14,5 g., acide nitrique (d = 1,65) 18 cc., eau 1 litre.

Vapeurs. - Parmi les gaz qu'on risque de trouver dans l'atmosphère d'un laboratoire, l'ozone, qui peut être produit par les lampes à vapeur de mercure, absorbe de façon marquée; le maximum d'absorption est situé à 4,8 μ, il existe aussi une bande intense vers 10 μ.

Le gaz carbonique présente des bandes nombreuses situées à 2,67 (faible), 4,27 (forte) et 14,7 μ (forte).

Le spectre d'absorption de la vapeur d'eau est très compliqué pour les courtes longueurs d'onde. L'absorption augmente progressivement à partir de 11 μ jusqu'à 17 μ où elle est très grande; elle intervient alors nettement sur le trajet des rayons dans les appareils de mesure pour les faibles concentrations de vapeur de l'air humide.

Les maxima sont dans le proche infrarouge à 0,944 μ, 1,13 μ, 1,41 μ, 1,90 μ, 3,2 μ, 5,2 μ.

TRANSMISSION DANS L'ULTRAVIOLET

Corps solides. - Les différents verres sont transparents seulement au début du domaine ultra-violet. Sous une épaisseur de 1 centimètre, ils absorbent très fortement vers 3.100 Å; la transmission cesse vers 2800 Å pour des lames de 1/10 de mm. En modifiant la composition des verres, on a réussi à augmenter la transparence à l'ultra-violet, les verres du type uviol transmettent encore 50% de la lumière à 2800 Å sous une épaisseur de 1 mm.

Le spath d'Islande est un peu plus transparent, il devient opaque sous une épaisseur de 1 centimètre vers 2150 Å.

Voici quelques données relatives au quartz cristallin qui est le plus souvent choisi pour les études dans l'ultra-violet et la construction des pièces optiques.

Longueur d'onde Å	Absorption en % pour 1 cm.
2192	1,1
2150	3,6
2026	13,7
1860	24,4

Ces nombres sont donnés à titre d'indication, car ils subissent des variations. Des fenêtres très minces de quartz cristallin sont utilisables jusque vers 1450 Å.

La silice fondue est moins satisfaisante: 2000 Å est la limite extrême d'utilisation. Il faut signaler que la transparence diminue à la suite d'une longue irradiation par les rayons ultra-violets.

La transparence du sel gemme est analogue à celle du quartz cristallin, mais il est plus réfringent. Ces 2 substances sont souvent associées, le quartz servant souvent à protéger le sel gemme de l'action de l'humidité, en interposant une couche mince de glycérine.

La fluorine est très transparente et transmet toutes les radiations de l'ultra-violet jusqu'à la région de Schuman (1250 Å). Les variétés colorées sont à rejeter.

Des cristaux artificiels sont fabriqués actuellement, halogénures alcalins et magnésie qui ont des propriétés intéressantes. La fluorure de lithium a des propriétés voisines de la fluorine, mais ne se conserve pas à l'humidité, sa limite de transparence est située à 1100 Å; elle peut être modifiée de quelques centaines d'Angströms sous l'influence d'une irradiation intense.

La magnésie a l'avantage de ne pas être attaquée, comme le quartz ou les verres ordinaires, par les vapeurs des métaux alcalins.

La calcite devient opaque à 2100 Å à peu près comme la silice fondue. Le celluloïd, sous forme de films de 300 à 400 Å d'épaisseur, obtenus en laissant s'évaporer sur l'eau une solution diluée de celluloïd dans l'acétate d'amyle, a une transmission qui varie de 50% à 20%, de 1700 à 900 Å et tombe à 5% au delà.

La gélatine des plaques photographiques absorbe beaucoup les radiations de longueur d'onde inférieure à 2250 Å.

Le baume de Canada, soluble dans le xylène, est transparent jusqu'à 3000 Å seulement.

Wood a montré que les métaux alcalins et l'argent déposés en couche mince sur une lentille ou une plaque de quartz transmettent la lumière ultra-violette. Les films d'argent présentent une absorption minima entre 3100 et 3300 Å. Le dépôt se fait soit par voie chimique suivant le procédé classique, soit par projection cathodique.

Les films des métaux alcalins sont obtenus par l'évaporation dans le vide du métal qui vient se condenser sur la surface refroidie par de l'air liquide, sinon le dépôt colloïdal a des propriétés différentes. La surface de quartz doit être dégazée très soigneusement à haute température avant de recevoir le dépôt métallique d'épaisseur telle qu'il soit opaque à la lumière solaire.

Le tableau suivant donne le début de la transparence des métaux alcalins classés par nombre atomique croissant. La transparence se poursuit jusqu'à 1860 Å au moins.

Cs 4400	Par exemple, un film de potassium réduit à
Rb 3600	1/4 l'intensité de la lumière incidente de longueur
K 3150	d'onde plus petite que 3150 Å et à 10^{-5} celle de
Na 2100	longueur d'onde supérieure à la limite de trans-
Li 2050	parence.

Liquides. - L'eau pure est relativement transparente en couche de 1 mm. d'épaisseur et devient à peu près complétement opaque au voisinage de 1750 Å.

Pour d'autres liquides, on trouvera des renseignements sur les courbes de la figure 69.

Gaz et vapeurs. - L'azote absorbe très peu les radiations ultra-violettes, quelques bandes apparaissent entre 1450 et 1225 Å et un fond continu intense à partir de 990 Å.

C'est surtout l'oxygène qui limite la transparence de l'air; les bandes de Schuman-Runge commencent à 1950 Å, elles convergent à 1760 Å; d'autres bandes intenses d'absorption continue se manifestent aux plus courtes longueurs d'onde. Entre ces bandes, l'oxygène est transparent, en particulier vers 1200 Å.

Dans les conditions ordinaires, les radiations de longueurs d'onde inférieures à 1850 Å ne sont pas transmises par l'air.

L'ozone en faible quantité ne modifie pas beaucoup la transmission des radiations par l'air. L'absorption du gaz carbonique ne commence qu'à 1712 Å; elle devient très intense à 1610 Å.

Pour la région de Schuman, l'hélium et l'hydrogène sont très transparents; la vapeur d'eau présente une bande forte dont le maximum se trouve à 1700 Å et une autre qui commence à 1392 Å et se prolonge au delà de 1250 Å.

Les courbes de transmission de la vapeur de chlore et de brome sont indiquées sur la figure 70. Elles sont limitées au visible et à l'ultra-violet, tous deux transmettant très bien les radiations au-dessous de 3000 Å.

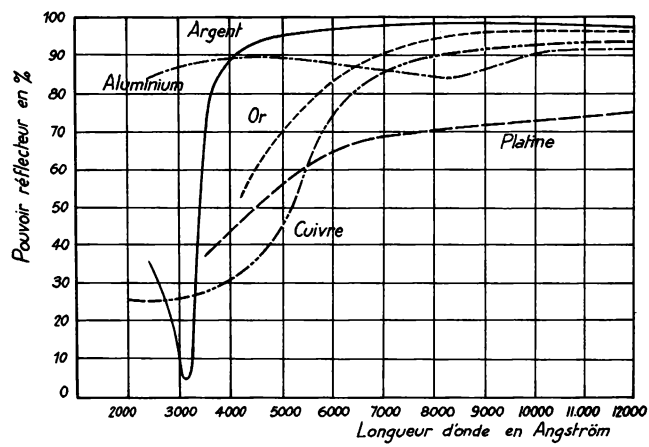


Fig. 59. - Pouvoir réflecteur de métaux.

Pouvoir réflecteur. - Le pouvoir réflecteur des métaux, c'est-à-dire le rapport de l'énergie réfléchie par la surface étudiée à l'énergie incidente reçue, est variable d'un métal à l'autre et, pour un métal donné, il est fonction de la longueur d'onde. Le pouvoir réflecteur des métaux devient très grand dans l'infra-

rouge lointain où il approche plus ou moins vite de 100%; il est maximum de toute façon pour l'incidence normale.

L'argent est, de tous les métaux, celui qui, dans le visible et l'infrarouge, a le plus grand pouvoir réflecteur; malheureusement, il décroît très vite entre 4000 et 3150 Å où il passe de 85% à 4% et remonte ensuite. C'est dans la bande autour de 3160 Å qu'un film d'argent est transparent; l'or est aussi un bon réflecteur dans l'infrarouge.

Les miroirs d'argent se ternissent vite; on peut les remplacer par des miroirs d'aluminium dont le pouvoir réflecteur est sensiblement inférieur mais reste à peu près constant; ils présentent l'avantage d'être utilisables dans tout l'ultra-violet. Les miroirs d'aluminium sont obtenus par condensation sur une surface de verre de la vapeur du métal dans le vide; après oxydation superficielle par traitement anodique, la surface ne se ternit pas.

Le platine a un pouvoir réflecteur médiocre, mais devient supérieur à l'aluminium pour les longueurs d'onde inférieures à 1000 Å; au-dessus de 1200 Å, c'est l'aluminium qui l'emporte.

Les substances cristallisées absorbent et réfléchissent de façon sélective. Cette propriété a donné naissance à une méthode de filtration, la méthode des rayons restants, dont il sera parlé plus loin.

LES FILTRES

Le problème de l'isolement d'une radiation monochromatique ne comporte pas de solution générale; la voie à suivre dépend de la source utilisée, de la pureté et de l'intensité de la radiation qu'on désire obtenir et du domaine spectral auquel elle appartient.

MONOCHROMATEURS

En principe, on amène devant une fente l'une des différentes images monochromatiques données par un prisme d'une première fente sur laquelle est concentrée la lumière complexe émise par une source. Le déplacement du prisme est commandé par un tambour gradué directement en longueurs d'onde; la vérification de la graduation est facile à faire dans le domaine visible en éclairant l'appareil au moyen d'une source donnant le spectre de raies d'un élément connu (par exemple l'arc à mercure). Dans la gamme des ultraviolets, les raies sont mises en évidence par fluorescence en plaçant, devant la fente de sortie du monochromateur, une lame de verre garnie de poudre de nitrate d'urane (obtenue en saupoudrant la lame préalablement recouverte d'une solution de baume du Canada), qui donne une fluorescence verte.

On peut également, si la raie qu'on veut observer est de faible intensité, recevoir la radiation sur une cellule photo électrique recouverte de salicylate de soude (fluorescence violette) et amplifier le courant photoélectrique.

La pureté des radiations monochromatiques ainsi obtenues est souvent suffisante, surtout si on prend la précaution de placer un filtre devant la fente d'entrée de l'appareil. Cette précaution est nécessaire car il en sort des radiations parasites de toutes longueurs d'onde, provenant de la diffusion et de réflexions multiples de la lumière sur les parois, les surfaces et les supports à l'intérieur du monochromateur. On diminue beaucoup l'intensité des raies parasites par la filtration préalable ne conservant qu'une bande de faible largeur autour de la raie désirée.

Un deuxième monochromateur est souvent utilisé pour des mesures de précision; il fait corps avec le premier, l'ensemble portant le nom de monochromateur double. La fente de sortie du premier sert en même temps de fente d'entrée pour le second.

Après le passage à travers un seul monochromateur, l'intensité lumineuse est réduite dans de grandes proportions, d'autant plus que pour avoir une bonne définition des raies, on est amené à se servir de fentes fines.

On peut transformer un spectrographe en monochromateur en remplaçant la plaque photographique par une lame métallique munie d'une fente mince là où vient se former l'image de la radiation cherchée.

Harrison (Rev. Sc. Instr. 5, 149, 1934) a décrit un monochromateur très facilement réalisable au laboratoire, de principe analogue au spectrographe Féry.

RADIATION DE RÉSONANCE

On peut profiter des propriétés des radiations de résonance pour les éliminer ou les isoler d'un faisceau de lumière.

Pour éliminer une radiation de résonance, celle du sodium par exemple (5890-5896 A), on placera sur le trajet du faisceau un récipient contenant de la vapeur de sodium sous une pression suffisante (dans le cas présent 1/10 de millimètre); les autres radiations du faisceau ne seront pas absorbées (sauf celles de la série principale du sodium).

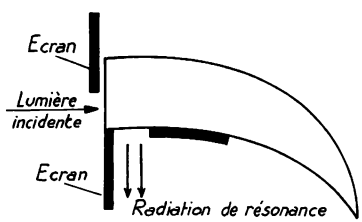


Fig. 60. - Lampe à résonance.

Si l'on veut isoler la même radiation, on commencera par l'absorber par la vapeur de sodium, sous pression plus faible de façon à ce que la lueur de résonance envahisse presque tout le récipient, on utilisera alors la lumière réémise dans la direction perpendiculaire à celle du faisceau incident.

La figure 60 représente une lampe à résonance dont la forme a été étudiée pour qu'il n'y ait pas de lumière parasite sortant dans la direction d'observation par suite de réflexions sur les parois. La corne est généralement noircie.

FILTRE DE CHRISTIANSEN

Ce filtre est simple en principe. Un faisceau parallèle de lumière monochromatique traversant un liquide n'est pas dévié si on place sur le trajet des rayons lumineux des particules de forme quelconque, obtenues en pulvérisant un corps solide isotrope et transparent, à condition que le liquide et le solide aient le même indice de réfraction pour la radiation utilisée.

Chaque particule est au contraire un centre de dispersion lorsque les indices sont différents, et on ne pourra recueillir à la sortie qu'une fraction très petite de l'énergie initiale.

Dans le cas d'un faisceau lumineux complexe, toutes les radiations, sauf une bande étroite, seront diffusées par les particules solides.

Il est nécessaire, pour obtenir de bons résultats, que les courbes de dispersion du liquide et du solide se coupent sous le plus grand angle possible.

Pour amener le point d'intersection dans la région spectrale désirée, on choisit des mélanges de liquide; de petites variations de concentration des constituants déplaçant progressivement la courbe de dispersion du liquide.

Par exemple, le mélange à 56% de benzène et 44% d'alcool a même indice de réfraction à 20° que la silice fondue, pour la radiation 3600 Å.

Ce genre de filtre est sensible aux variations de température. Le maximum de la courbe de transparence du filtre précédent se déplace de 3900 à 3100 Å lorsque la température s'élève de la température ordinaire à 50°. Weigert signale que le maximum de transparence d'un filtre, constitué de verre crown et de benzoate de méthyle, est déplaçable par élévation de température, entre 18 et 50°, dans presque tout le spectre visible.

Cette sensibilité à la température oblige à placer le filtre dans un thermostat et, en même temps, interdit de l'irradier par un faisceau de lumière intense, non débarrassé des radiations infra-rouges.

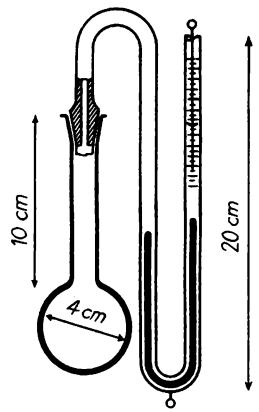


Fig. 61. - Filtre à régulateur de température.

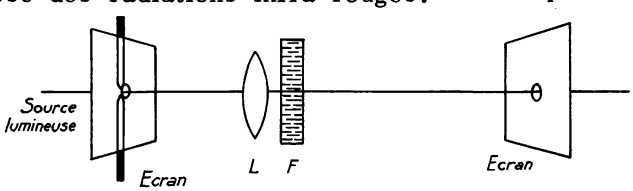


Fig. 62. - Montage schématique d'un filtre de Christiansen.

La figure 61 donne les dimensions d'un filtre étudié par Fragstein, le mercure commandant le relais d'un régulateur de température.

On placera, comme l'indique la figure 62, à l'endroit où se forme l'image de la source lumineuse, donnée par la lentille L, un diaphragme percé d'une ouverture de dimension égale à celle de l'image pour éliminer la lumière diffusée. La pureté spectrale de la lumière transmise dépend de la distance entre le filtre F et la lentille qui doit être aussi faible que possible.

L'intensité de la lumière transmise varie avec la longueur d'onde du maximum de transparence; elle croît lorsque celle-ci augmente. Par rapport à l'intensité incidente, elle est généralement comprise entre 0,25 et 0,5 (fig.63).

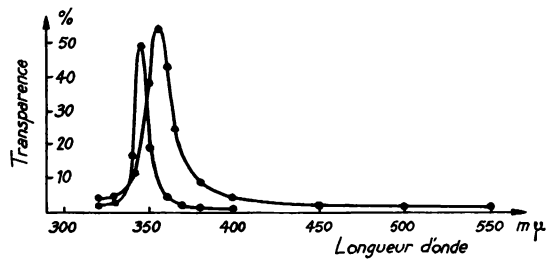


Fig. 63. - Courbes de transparence du filtre.

Ce filtre est intéressant à utiliser avec des sources intenses donnant un spectre de raies.

ISOLATION FOCALE

Un autre procédé de filtration applicable aux sources à émission sélective permet d'isoler certaines radiations ultra-violettes; il a une grande importance également dans le domaine infra-rouge.

On sait qu'une lentille, non corrigée des aberrations chromatiques, donne d'une source de lumière complexe, différentes images non superposées; les rayons lumineux étant d'autant moins réfractés que leur longueur d'onde est plus grande. Par exemple, l'indice de réfraction du quartz est pour :

λ = 1980 Å	n = 1,65070
5340 Å	1,54663
56 μ	2,18

La lumière issue de la source est concentrée par une lentille sur un diaphragme percé d'une petite ouverture, placé exactement dans la position qui correspond à la focalisation de la lumière de longueur d'onde désirée. Les autres radiations sont donc interceptées de façon importante. La pureté spectrale est encore augmentée aux dépens de l'intensité, en utilisant un deuxième étage de filtration analogue au premier.

L'efficacité de la méthode est maximum dans le domaine spectral pour lequel la variation de l'indice de réfraction avec la longueur d'onde est la plus grande; cette condition est réalisée pour le quartz dans l'ultra-violet entre 2150 et 1850 Å.

Forbes a trouvé que la pureté des raies de l'aluminium 1940 Å isolées par ce procédé est de 98%, avec une intensité environ sept fois plus grande que celle obtenue avec un bon monochromateur.

La même méthode a donné pour les raies du zinc 2140 Å une pureté de 80%; on gagne encore au point de vue intensité par rapport au monochromateur.

Wood et Rubens ont utilisé la méthode d'isolation focale pour séparer les radiations de longueurs d'onde supérieures à 80 μ émises par le bec Auer et par la lampe à vapeur de mercure en silice. La transparence de la silice, très faible entre 60 et 80 μ, redevient en effet importante au delà de 80 μ.

La lentille de quartz L_1 donne, d'une ouverture circulaire de 15 mm. de diamètre percée dans un écran E_1, formé de 2 feuilles d'étain et éclairé par le bec Auer A, une image réelle uniquement pour les radiations de l'infra-rouge lointain dont l'indice de réfraction par rapport au quartz, est supérieur à 2 (fig.64). Les autres radiations émergent de la lentille suivant un cône divergent. Un autre écran E_2, dont la position dépend de la radiation qu'on veut isoler est percé également d'une petite ouverture de 15 mm. de diamètre; elle est protégée des radiations de courtes longueurs d'onde se propageant dans une direction voisine de l'axe du système par deux petits disques opaques D, collés sur la lentille. La méthode est bonne lorsque la source émet de façon sélective, sinon toutes les radiations dont l'indice de réfraction avoisine 2,1 arrivent sur le récepteur. Dans ces conditions, elle doit être utilisée entre 100 et 400 μ.

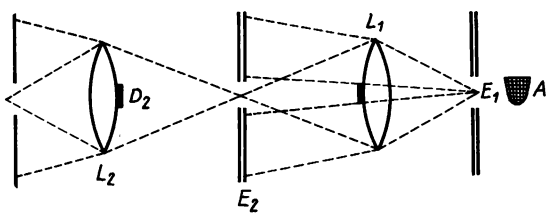


Fig. 64. - Méthode d'isolation focale.

En associant la méthode d'isolation focale et celle des rayons restants, on a un moyen excellent d'obtenir un rayonnement monochromatique.

RAYONS RESTANTS

La méthode a été découverte par Rubens et Nichols à la suite de leurs recherches sur la réflexion des rayons infrarouges. Les corps solides, surtout dans l'état cristallisé, possèdent la propriété de réfléchir de façon sélective un petit nombre de radiations du domaine infrarouge. Le pouvoir réflecteur passe par des maxima très accentués correspondant à la réflexion métallique; il atteint souvent 80%. Les minima, qui s'étendent sur la plus grande partie du spectre, ont une valeur faible (quelques centièmes). Par des réflexions successives sur un corps approprié, il ne subsiste plus que les quelques radiations privilégiées : les "rayons restants", les autres étant pratiquement supprimés.

On peut souvent, en plaçant des filtres convenables sur le parcours des rayons restants, conserver seulement un faisceau quasi monochromatique. Par exemple, les rayons restants de la fluorine sont situés à 24,4 μ et à 31,6 μ et cette dernière radiation est absorbée par une mince couche de chlorure d'argent. Les filtres sont souvent employés pour intercepter les infrarouges de courte longueur d'onde dont il est difficile d'éviter la présence. Il faut toutefois, dans ce cas, tenir compte de l'absorption propre et du pouvoir réflecteur des filtres dans la région de la bande réfléchie, qui modifient la longueur d'onde du maximum d'intensité des rayons restants.

La source S est choisie de façon à donner la plus grande intensité possible dans le domaine spectral recherché. Après avoir été rendu parallèle au moyen d'un miroir métallique, le faisceau provenant de la source est réfléchi successivement par les surfaces cristallines C_1, C_2, C_3, C_4, au nombre de 4 par exemple, fixées sur des supports orientables. L'angle d'incidence doit être petit. Un second miroir métallique M_2 concentre les rayons restants sur l'appareil récepteur (fig. 65). On effectue le réglage en lumière visible en plaçant au besoin sur les surfaces cristallines de petits miroirs plans.

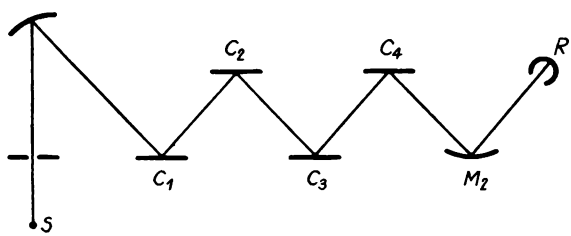


Fig. 65. - Méthode des rayons restants avec un faisceau parallèle.

Les miroirs métalliques en argent, or ou cuivre, conviennent très bien, l'aluminium traité anodiquement est excellent au-delà de 2 μ.

La surface doit être propre et polie si l'on travaille avec de petites longueurs d'onde, sinon le polissage importe peu. Il faut même remarquer que, si les surfaces sont rugueuses, les radiations du proche infra-rouge sont diffusées et affaiblies, alors que celles de grande longueur d'onde sont réfléchies géométriquement.

Dans un dispositif légèrement différent, au lieu d'utiliser un faisceau parallèle, on concentre les radiations sur les surfaces cristallines au moyen de miroirs métalliques orientables (fig. 66).

Les surfaces cristallines sont polies par frottement sur du drap avec du rouge d'Angleterre. Le polissage se fait à sec ou avec addition d'eau ou d'alcool. La durée de conservation des surfaces comme celles de sel gemme, détériorables par l'action de l'humidité, augmente avec le degré de polissage.

Il est quelquefois impossible de se procurer des cristaux de dimensions suffisantes; on tourne la difficulté en utilisant une

mosaique de petits cristaux qu'on place sur le support et qu'on polit ensuite.

Quand on a une matière pulvérulente, on prépare une surface réfléchissante par compression à plusieurs centaines d'atmosphères. Une autre technique consiste à fondre la substance et à l'utiliser sous forme de plaque. Le procédé est valable à condition qu'il n'y ait pas décomposition chimique de la substance.

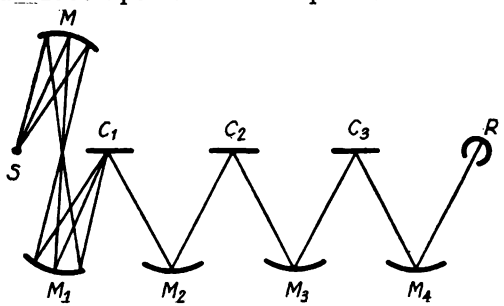


Fig. 66. - Méthode de rayons restants avec un faisceau convergent.

On enferme l'ensemble des miroirs métalliques et des surfaces cristallines dans une boîte étanche dont l'atmosphère est desséchée en permanence par de l'anhydride phosphorique. La vapeur d'eau absorbe en effet très fortement dans l'infra-rouge lointain. Les radiations pénètrent dans la boîte à travers une fenêtre transparente appropriée. Il faut se méfier des radiations ultra-violettes de courte longueur d'onde qui peuvent provoquer la formation d'ozone absorbant fortement, en particulier vers 5,75 μ et 10 μ.

Le gaz carbonique transmet très mal les radiations vers 2,67 μ, 4,27 μ et 14,7 μ.

On trouvera dans le tableau suivant la longueur d'onde moyenne de la bande des rayons restants donnés par diverses substances.

Nombre de réflexions	Substances	Filtre supplémentaire	Longueur d'onde moyenne
4	Quartz	1 cm. KCl	20,7 μ
3	Fluorine	5 mm. KCl	23,
2	-	3 mm. KBr	27,3
4	Calcite		29,4
3	Fluorine	0,4 mm. SiO_2	32,8
3	Aragonite	0,4 mm. SiO_2	41
4	Chlorure de sodium	-	52
4	Chlorure de potassium	-	63
1	Bromure de potassium	-	83
1	Iodure de potassium	-	94
1	Bromure de thallium	-	117
1	Iodure de thallium	-	152

La lumière est filtrée d'abord par une couche de paraffine de 3 mm. d'épaisseur qui ne transmet pas les rayonnements de courte longueur d'onde.

UTILISATION DE MILIEUX ABSORBANTS

L'isolement d'une raie ou d'un groupe de raies peut se faire très souvent sans trop de diminution de l'énergie lumineuse au moyen de substances qui absorbent de façon sélective.

On trouve dans le commerce une grande quantité de filtres valables pour les différents domaines spectraux; ce sont des verres ou des feuilles de gélatine colorés par des substances déterminées. Ces filtres sont généralement fabriqués à l'étranger.

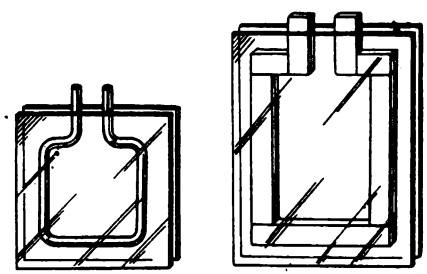


Fig. 67. - Cuves à faces parallèles.

Au laboratoire, il est facile de préparer des filtres liquides qui seront placés dans de petites cuves, la nature de leurs parois dépend de la région de transparence requise.

Construction des cuves d'absorption. - On constitue avec des barreaux prismatiques un cadre rectangulaire, ou bien on courbe au chalumeau une baquette de verre de diamètre convenable suivant la forme indiquée sur la figure 67, le cadre obtenu étant rectifié en l'appliquant à chaud sur une plaque de graphite. Les côtés du cadre sont rodés pour avoir une surface de contact plus importante avec les plaques de verre ou de quartz qui limiteront la cuve. L'étanchéité sera assurée pour la plupart des liquides avec de la picéine. Dans le cas des liquides organiques, on emploiera de la colle de poisson ou un ciment formé d'une pâte d'oxyde de zinc et de silicate de soude. Le ciment obtenu en dissolvant la gélatine dans une solution chaude d'acide acétique glacial, jusqu'à consistance pâteuse, convient pour l'alcool ou d'autres solvants analogues. On scelle les cuves contenant du chlore avec de la naphtaline perchlorée ou, si les expériences sont de courte durée, avec un mélange en parties égales de colophane et de cire pure.

Les faces de verre de la cuve seront découpées dans des plaques photographiques, débarrassées de la couche de gélatine par immersion dans une solution d'hypochlorite.

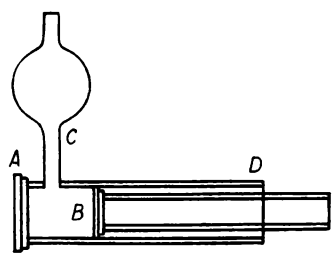


Fig. 68. - Cuve de Baly.

La cuve de Baly (fig.68) a l'avantage d'avoir une épaisseur variable à volonté. Deux tubes de verre coulissent l'un dans l'autre; ils sont terminés à une extrémité par une collerette rodée sur

laquelle est scellée une plaque transparente. Le réservoir contient l'excès de liquide nécessaire pour remplir la cuve aux grandes épaisseurs. Les déplacements du tube intérieur sont rendus possibles par glissement dans un tube de caoutchouc épais qui assure l'étanchéité. L'épaisseur de liquide est lue sur le tube extérieur gradué en millimètres.

Pour les très faibles épaisseurs, on intercale entre les faces des feuilles de mica ou encore des fils de platine bien calibrés.

Solutions absorbantes. - La figure 69 donne les spectres d'absorption de différentes substances dans le visible et l'ultra-violet, d'après Wood.

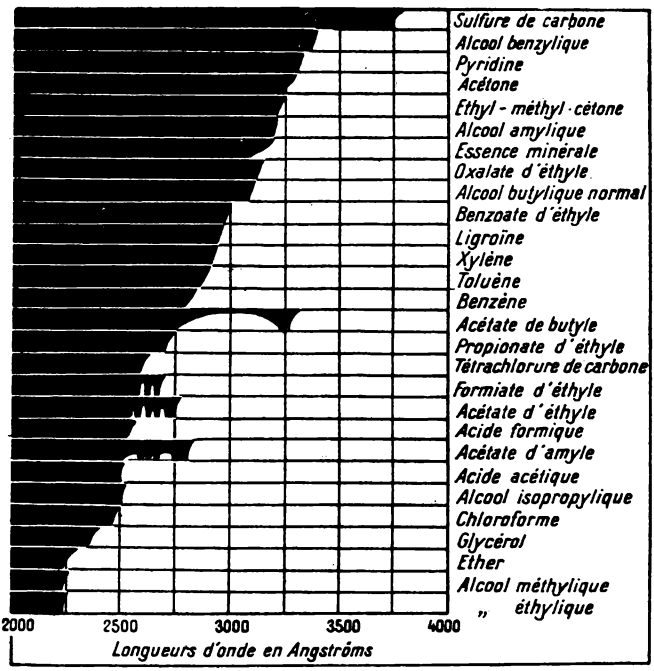


Fig. 69. - Spectre d'absorption dans l'ultra-violet et le visible de différents liquides purs.

Les solvants et les substances absorbantes doivent être dans un haut état de pureté, surtout s'il s'agit de préparer des liquides pour la région ultra-violette.

Les solvants les plus employés sont l'eau, l'alcool méthylique ou éthylique et l'éther dont la transparence est bonne vers 2200 Å, la glycérine n'est convenable que jusqu'à 2300 Å.

Pour prédéterminer un filtre, il est nécessaire de connaître le coefficient d'absorption de la substance afin de calculer la densité et l'épaisseur, de façon à obtenir le degré de transparence voulu dans la région de longueur d'onde utile. Avec le filtre de Baly, on peut opérer de façon moins systématique en examinant directement au spectroscope ou en enregistrant les radiations émergentes.

Les filtres de gélatine sont obtenus en recouvrant une plaque de verre bien plane (nettoyée au mélange sulfo-chromique et rincée à l'alcool) par une solution de gélatine contenant la matière colorante. On laisse sécher à l'air à l'abri des poussières. Le film arraché est conservé entre 2 plaques de verre. Ces filtres sont très sensibles aux variations de température et aux irradiations intenses.

Certaines solutions subissent des décompositions photochimiques; elles doivent être renouvelées constamment pour conserver leurs propriétés.

Au-dessous de 3000 Å, il y a peu de filtres ou de combinaisons de filtres.

Une solution approchée consiste à utiliser les vapeurs de brome ou de chlore, et même les deux éléments, dans des récipients de silice.

On en chasse l'air par circulation prolongée ou encore, après avoir fait le vide dans le récipient à parois épaisses, on y condense du chlore en plongeant une extrémité dans l'air liquide; on scelle et laisse revenir à la température ordinaire (la pression de la vapeur de chlore saturée à 15° est de 6 atmosphères).

Lord Rayleigh indique qu'une couche de vapeur saturée de brome de 5 cm. d'épaisseur, combinée avec une couche de 15 cm. de chlore à la pression atmosphèrique, supprime toutes les raies de l'arc à mercure de 2652 Å à la raie verte comprise.

Les verres colorés fortement avec l'oxyde de nickel transmettent la raie 3650 et sont opaques au visible.

Bowen a donné tout un ensemble de filtres qui permettent d'isoler des groupes de raies émises par une lampe à vapeur de mercure.

Le spectre est divisé en deux parties, la frontière étant 3650 Å.

Pour avoir une grosse intensité, un ballon de 10 cm. de diamètre en silice ou en verre, suivant le cas, est placé au voisinage de la source; il est rempli avec l'une des 3 solutions de la colonne 2 du tableau ci-après. Il donne un faisceau à peu près parallèle qui traverse les autres filtres dont les caractéristiques sont indiquées à la suite.

Les sulfates de nickel et de cobalt coupent pratiquement tout l'infra-rouge, le visible et le début de l'ultra-violet de 4.000 à 3.650 A; la solution doit être dépourvue de traces de fer.

En s'aidant des courbes de transmission de la fig.70, on peut apporter des variantes au tableau précédent, par exemple, le mélange de chrysoïdine et d'éosine transmet seulement les raies jaunes 5770-5790 Å.

On dilue la chrysoïdine et on ajoute l'éosine jusqu'à la disparition de la raie verte. Pour les radiations 5460 Å, on peut, avec le bichromate de potassium, ajouter un filtre au nitrate de néodyme qui absorbe le groupe des raies jaunes.

Les solutions de nitrosodiméthylaniline se comportent en partie comme le brome. Les films métalliques (Ag. et métaux

alcalins, voir transmission dans l'ultra-violet des corps solides) ont des propriétés intéressantes.

Lumière du jour artificielle. - Pour les mesures sensitométriques, on a cherché à obtenir une source de lumière Standard dont la courbe de répartition énergétique dans le spectre visible soit extrêmement voisine de celle de la lumière solaire moyenne à Washington.

Le problème a été résolu par l'emploi d'une lampe à filament de tungstène alimentée en courant continu, fonctionnant à la tem-

<table>
<tr><td>Raies du mercure</td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>2.480
2.540</td><td rowspan="4">145 g. SO_4 Ni 6 - 7 H_2 O
+ 41,5 g. SO_4 Co 7 H_2 O dans un litre d'eau.</td><td rowspan="2">Chlore gazeux à la pression atmosphérique 3 cm.</td><td>0.108 g. d'iode + 0,155 d'iodure de potassium dans 1 l. d'eau : 1 cm (×)</td></tr>
<tr><td>2.650
2.700</td><td>tetrachlorure de carbone, 2 mm. (×) ou $HgCl_2$ 45 g. par litre d'eau : 1 cm (*)</td></tr>
<tr><td>2.750
2.805</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>2.895
2.925
2.970
3.030</td><td colspan="2">acide oxalique 20 g. par litre 1 cm, ou SO_4Cu 5 H_2 O 15 g. par litre 1 cm. (×)</td></tr>
<tr><td>3.135</td><td colspan="2">phtalate acide de potassium 5 g. par litre : 1 cm. (×)</td></tr>
<tr><td>3.340</td><td colspan="2">solution concentrée d'acide urique : 1 cm. (×)</td></tr>
<tr><td>3.660</td><td rowspan="3">4,4 g. So_2 Cu, 5 H_2O + 150 cc NH_4 OH densité 0,88 dans 1 litre d'eau.</td><td colspan="2">2 - 3 mm. verre noir pour ultra-violet</td></tr>
<tr><td>4.050</td><td colspan="2">Iode dans CCl (7,5 g. par litre). 1 cm. + chlorhydrate de quinine 10 g. par litre : 2 cm. (×)</td></tr>
<tr><td>4.360</td><td colspan="2">1 cm. d'une solution de 75 g. de NO_2 Na dans 100 cc. d'eau (*)</td></tr>
<tr><td>5.460</td><td rowspan="2">13 g. SO_4Cu 5 H_2O + 0,44 g. Cr_2 P_7 K_2 + 50 cc SO_4H_2 concentré dans 1 litre d'eau.</td><td colspan="2">Filtre Corning 512 : 5 mm.</td></tr>
<tr><td>5.770
5.790</td><td colspan="2">Filtre Corning 344 : 3,4 mm.</td></tr>
<tr><td colspan="4">N.B. - Les solutions marquées d'un astérisque doivent être changées de temps en temps. Les solutions marquées d'une croix × fréquemment.</td></tr>
</table>

pérature de couleur de 2360° K. Les radiations émises sont filtrées en traversant une cuve à deux compartiments de 10 ± 0,05 mm. d'épaisseur chacun.

Le premier contient la solution I :

Solution I	Sulfate de cuivre cristallisé Mannite	3,707 g.
	Pyridine purifiée incolore à 98%	30 cc
	Eau distillée pour faire	1 litre

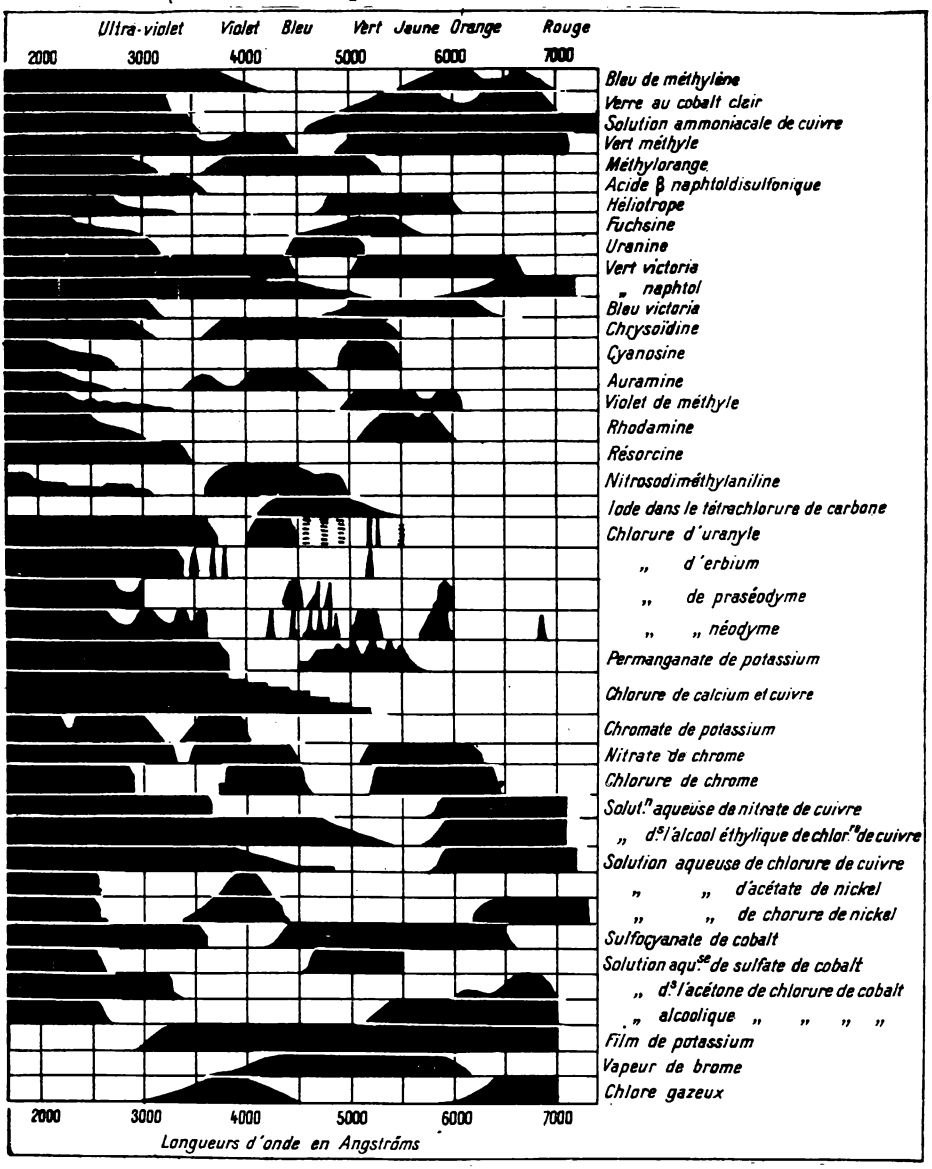


Fig. 70. - Spectres d'absorption dans l'ultra-violet et le visible de divers corps en solution.

Le second est rempli avec la solution II.

Solution II	Sulfate double de cobalt et d'ammonium cristallisé.	26,827 g.
	Sulfate de cuivre cristallisé	27,180 g.
	acide sulfurique d = 1,835	10 cc
	eau distillée pour compléter à un litre.	

Les 3 faces de la cuve sont en crown borosilicate d'indice $n_D = 1,51$; elles ont $2,5 \pm 0,1$ mm. d'épaisseur.

Dans le domaine infra-rouge, il a été signalé déjà que certaines solutions et l'eau sont très opaques. Il est souvent intéressant de couper le visible et de laisser passer l'infra-rouge proche. A cet égard, une solution de sulfate de vanadyle bleu intense (épaisseur 15 mm.) transmet depuis 0,9 μ jusqu'à 1,5 μ, limite de transparence de l'eau, en même temps, le bleu et le vert passent également. Les radiations du visible peuvent être absorbées par un des filtres en verre du commerce qui laissent passer l'infra-rouge, entre 1 et 4 μ environ. Ce sont des verres au manganèse et au cobalt.

La méthode des poudres dont il a été parlé permet d'obtenir des couches d'épaisseur variable d'oxydes ou d'autres produits sur des supports transparents. La transmission de ces couches minces est nulle pour le visible, le début de la transparence pouvant être décalé dans l'échelle des longueurs d'onde en faisant varier l'épaisseur des films ou la grosseur des grains de la substance.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages fondamentaux

BALY. - Spectroscopy, Longmans, New-York.

LECOMTE. - Le spectre infrarouge, Presses Universitaires de France.

LYMAN. - The extrem ultraviolet.

STRONG. - Experimental Procedures in Physics, New-York.

WOOD. - Physical Optics, Macmillan, New-York.

Handbuch der Physik.

Périodiques

Revue d'Optique, Paris.

Journal of the Optical Society of America, New-York.

Review of Scientific Instruments, New-York.

SEPTIÈME CHAPITRE

LES CELLULES PHOTOÉLECTRIQUES

par

A. LALLEMAND

Astronome titulaire à l'Observatoire de Paris

et

M. MUNSCH

Lieutenant de Vaisseau

LES CELLULES PHOTOÉLECTRIQUES

DESCRIPTION ET PROPRIÉTÉS DES CELLULES PHOTOÉLECTRIQUES 383
Introduction 383
Cellules photoémissives à vide 384
Cellules aux métaux alcalins 385
Cellules pour l'ultra-violet 387
Cellules comportant des éléments amplificateurs du courant primaire 388
Choix d'une cellule à multiplicateurs d'électrons 392
Cellules à couche d'arrêt 394
Cellules photoconductrices 396
Cellules au sulfure de cadmium 397
Cellules au sulfure-tellurure et séléniure de plomb 399
Cellules au PbS 406
Cellules au PbTe 406
Cellules au PbSe 406
Phototransistors 407

MESURES ET UTILISATION DES COURANTS PHOTOÉLECTRIQUES 407
Mesures Galvanométriques 407
Mesures électrométriques 408
Méthode de la résistance de charge 409
Utilisation de tubes à vide 412
Relais électro-lumineux 412
Emploi de cellules photoélectriques en photométrie 414

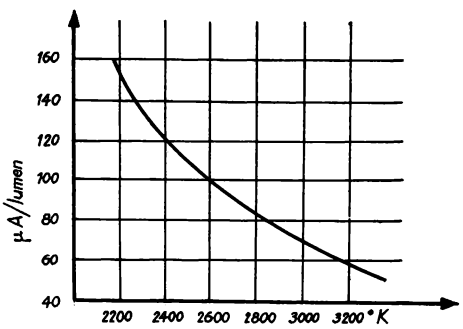
SEPTIÈME CHAPITRE

LES CELLULES PHOTOÉLECTRIQUES

DESCRIPTION ET PROPRIÉTÉS DES CELLULES PHOTOÉLECTRIQUES

INTRODUCTION

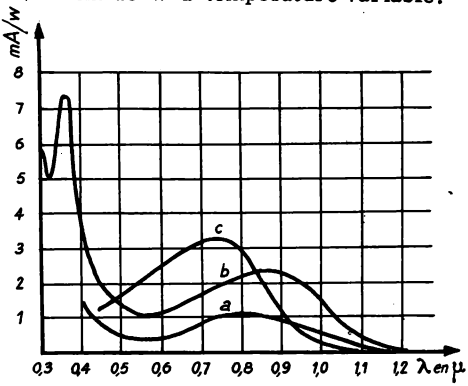
Considérons une cellule recevant un flux lumineux monochromatique ; on appelle émission le rapport du courant de saturation de la cellule au flux reçu par la photocathode. Ce rapport est exprimé en milliampères par watt ou en coulombs par calorie. On néglige l'influence de l'incidence, de la forme géométrique de la cathode et la façon dont le rayonnement atteint la photocathode. La variation de ce rapport en fonction de la longueur d'onde donne la courbe de sensibilité spectrale.



a) Courbe de réponse d'une cellule

Fig. 1.- Cellule au Cs éclairée par un filament de W à température variable.

Si la source utilisée n'est pas monochromatique, on peut définir la répartition spectrale de son rayonnement En multipliant les ordonnées correspondant à une même longueur d'onde de la courbe de sensibilité spectrale de la cellule et de répartition spectrale de la source, on obtient une courbe dont l'intégration fournit la réponse globale pour le rayonnement considéré ; on l'exprime en microampères par lumen ou en milliampères par watt ; elle dépend toujours de la qualité du rayonnement utilisé. Comme source, on utilise presque



b) Sensibilité spectrale de trois cellules différentes

toujours la lampe à filament de tungstène, mais on n'a malheureusement pas fixé de température de référence et les résultats varient considérablement avec la température de la source. Si cette température n'est pas indiquée, les données fournies n'ont pas de grande signification. La figure 1 montre, pour une cellule au cœsium la variation de la réponse globale en microampères par lumen, en fonction de la température du filament. Avec une autre cellule, les résultats peuvent être complètement transformés.

Le fait d'exprimer une réponse globale en microampères par lumen est justifié dans le domaine du spectre visible, mais il peut entrainer des confusions regrettables, et il perd toute signification si une partie importante du rayonnement agissant sur la cellule est située dans l'ultra-violet ou l'infrarouge. Aussi, on obtient une représentation beaucoup plus correcte, plus facilement utilisable et plus proche de la réalité si on exprime la réponse globale en milliampères par watt.

La courbe de sensibilité spectrale ne suffit pas à caractériser une cellule, car elle ne définit pas à elle seule la capacité de la cellule à mesurer ou à détecter une quantité minimum d'énergie. Cette quantité d'énergie minimum (hatibuellement exprimée en microlumens ou en microwatts) est déterminée par le "bruit de fond" de la cellule ; on peut l'exprimer en microwatts, c'est une caractéristique essentielle à connaitre.

CELLULES PHOTOÉMISSIVES A VIDE

La partie sensible ou photocathode est un métal ou une couche à structure plus complexe. Les électrons sont émis par effet photoélectrique et sont recueillis par l'anode, portée à un potentiel positif par rapport à la cathode.

On peut distinguer les cellules à anode centrale (fig. 2) où la cathode C entoure l'anode A et les cellules à cathode centrale

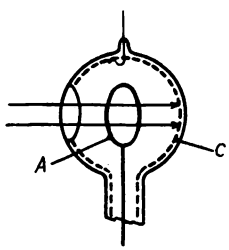


Fig. 2.- Cellule à anode centrale.

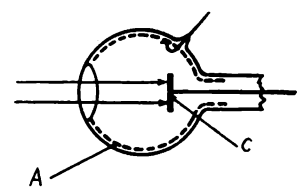


Fig. 3.- Cellule à cathode centrale.

(fig. 3) dans lesquelles l'anode A entoure la cathode C. Dans le cas de la cellule à anode centrale il faut, pour collecter les électrons, appliquer une tension assez élevée entre les deux électrodes ; pour un flux constant, le courant varie comme l'indique la figure 4.

Lorsque le courant devient sensiblement constant en fonction de la tension, on dit que l'on se trouve dans le domaine de la saturation. Les cellules à cathode centrale possèdent aussi un domaine de saturation, mais qui est obtenu avec des tensions beaucoup plus faibles, de quelques volts. Dans le domaine de saturation, le courant photoélectrique continue à croitre très lentement lorsque la tension augmente (le travail de sortie des électrons diminue quand le champ électrique d'extraction augmente ; d'autre part, la cathode est toujours plus ou moins rugueuse et un champ plus élevé permet d'extraire plus d'électrons des anfractuosités de sa surface). Quelquefois, des cellules très sensibles possèdent en plus certaines anomalies du courant de saturation : lorsque la tension croit de façon continue, le courant de saturation passe par une discontinuité pouvant atteindre 10 à 20 %. Ces cellules sont impropres aux mesures photométriques.

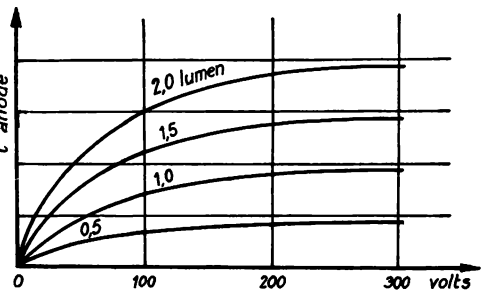


Fig. 4.- Variation du courant anodique avec la tension appliquée.

CELLULES AUX MÉTAUX ALCALINS

La réponse des cellules au cœsium est tellement plus grande que celle obtenue avec les autres métaux alcalins qu'on les utilise dans la plupart des applications.

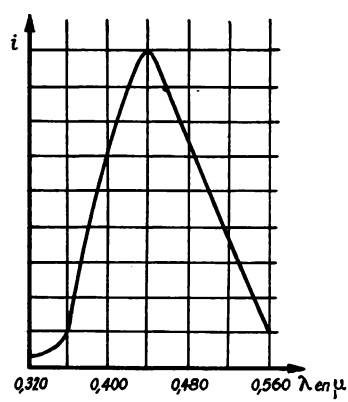


Fig. 5.- Sensibilité spectrale d'une cellule à K sensibilisée.

Nous donnons figure 5 la sensibilité spectrale d'une cellule au potassium sensibilisée, car ces cellules peuvent trouver au laboratoire certaines applications par suite de leur courant résiduel extrêmement faible. Smith a signalé des courants d'obscurité de l'ordre de 5.10^{-18} ampères. Si l'on veut entreprendre une étude pour des longueurs d'onde inférieures à 0,6 μ, on est certain, en utilisant ces cellules, de ne pas introduire d'erreurs dues au rayonnement parasite infra-rouge, auquel elles ne sont pas sensibles.

La figure 6 donne la sensibilité spectrale de deux cellules au cœsium sur argent oxydé.

Le seuil pour les grandes longueurs d'onde est situé vers 1,2 μ ou 1,3 μ ; il a été signalé des cellules pour lesquelles le seuil atteignait 1,7 μ, mais ceci est exceptionnel; le maximum d'émission se trouve vers 0,7 μ ou 0,8 μ.

La réponse en infra-rouge peut varier d'une manière considérable d'une cellule à une autre, et la réponse globale pour une lampe à filament de tungstène sans filtre n'est pas toujours un critérium suffisant, ainsi que le montrent les courbes de la figure 6 relatives à deux cellules désignées par A et B.

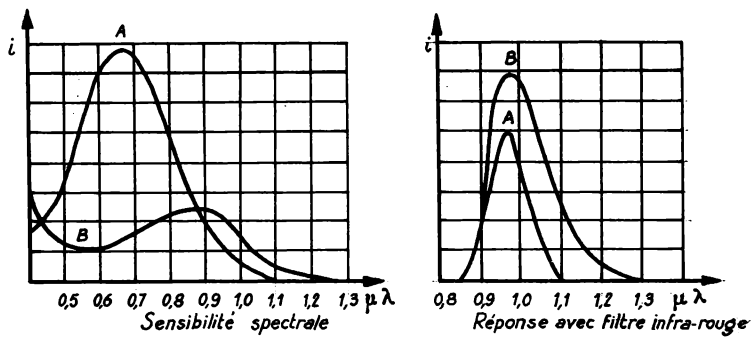


Fig. 6.- Comparaison de deux cellules : Sans filtre infra-rouge - avec filtre infra-rouge

La cellule A, pour une lampe à filament de tungstène (T = 2.600° K), donne une réponse plus grande que la cellule B; après interposition d'un filtre infra-rouge, c'est le contraire qui se produit.

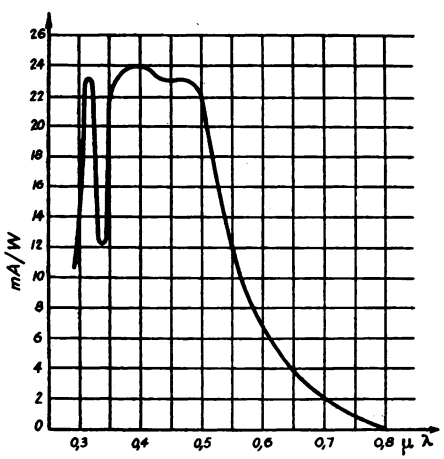


Fig. 7.- Sensibilité spectrale d'une cellule Sb Cs .

La figure 7 représente la courbe de sensibilité spectrale d'une cellule antimoine-cœsium. Il n'est pas indiqué d'utiliser ces cellules avec des sources de température de couleur peu élevée, mais elles surpassent les cellules au cœsium sur argent oxydé dès que la température de couleur atteint 3000° K. La mesure de la sensibilité d'une cellule antimoine cœsium, déterminée par la réponse globale à une lampe à filament de tungstène, est notoirement insuffisante, car le maximum de sensibilité de la cellule se trouve dans une région où la lampe rayonne très peu d'énergie. Il faut avoir soin d'utiliser une source dont la température de couleur soit de l'ordre de 6.000° K ; pour cela, on peut avoir recours à des filtres, car la lumière du jour, qui conviendrait bien, est difficilement utilisable.

Le rendement quantique , c'est-à-dire le nombre d'électrons émis par quantum incident, atteint environ 10 % pour les couches Sb-Cs et 1 % pour les couches Ag-Cs_2O-Cs au maximum de la réponse. Des recherches en cours laissent prévoir des rendements quantiques plus élevés allant jusqu'à 25 %.

Dans les cellules photoémissives à vide, le bruit de fond est déterminé par le courant d'obscurité qui, pour les couches Ag-Cs_2O-Cs, est d'environ 10^{-12} A/cm^2, mais peut varier facilement d'une puissance de 10. Il augmente généralement avec la sensibilité de la cellule. En fonction de la température, il suit la loi de Richardson. Les couches Sb-Cs ont un bruit de fond plus faible que les couches Ag-Cs_2 O-Cs ; leur émission thermique est de l'ordre de 10^{-14} A/cm^2.

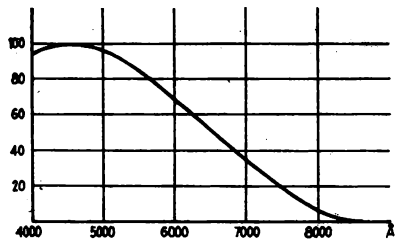


Fig. 8.- Sensibilité spectrale d'une cellule Bi - O - Ag - Cs.

Dans ces dernières années, de nouvelles couches contenant quatre éléments : Bismuth, Argent, Oxygène et Cœsium ont été mises au point, leur sensibilité spectrale (fig. 8) s'étend plus loin vers le rouge que celle des cellules antimoine cœsium. Bien que le rendement quantique de ces couches Bi-O-Ag-Cs soit inférieur à celui des couches Sb-Cs, la réponse pour une lampe à filament de tungstène est au moins égale (60 µA/lumen). Cette sensibilité spectrale bien répartie dans le visible les a fait adopter dans les appareils de prise de vue de télévision.

CELLULES POUR L'ULTRA-VIOLET

Les cellules photoélectriques en verre ne peuvent être utilisées dans l'ultra-violet, par suite de l'absorption du rayonnement par la fenêtre d'entrée. Il est cependant possible d'utiliser indirectement ces cellules en déposant sur la fenêtre une couche assez épaisse (quelques dizièmes de mm.) constituée par un mélange de salicylate de sodium et de dextrine. Le rayonnement de fluorescence du salicylate de sodium se compose d'une large bande bleue - violette pour laquelle la distribution de l'énergie est pratiquement indépendante de la longueur d'onde du rayonnement excitateur entre 2.000 et 3.400 Å. C'est ce rayonnement de fluorescence qui agit au travers du verre sur la photocathode.

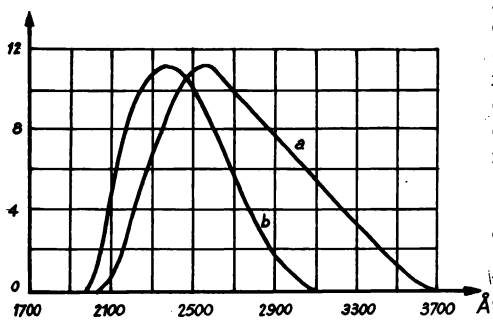


Fig. 9.- Sensibilité spectrale d'une cellule à cathode de Th (a) et de Ta (b).

Pour utiliser directement l'effet photoélectrique du rayonnement ultra-violet, on peut employer des cellules à fenêtre de quartz. Une solution beaucoup plus élégante consiste à utiliser des verres Pyrex ou Thuringe sous des épaisseurs très faibles (quelques centièmes de mm.) ; dans ces conditions, on peut atteindre des longueurs d'onde allant jusque vers 2.200 Å. La photocathode peut être au magnésium ; l'émission pour λ = 2.600 Å est d'environ 2.10^{-4} amp/watt, ce qui équivaut à 1 électron pour 1.000 quanta ; le seuil photoélectrique se situe vers 3.875 et 3.425 Å. En donnant à la fenêtre une épaisseur convenable, on parvient à réaliser un récepteur dont la courbe de sensibilité spectrale présente un maximum vers 2.500 ou 2.600 Å. Une telle cellule peut servir pour la comparaison rapide des activités abiotiques des rayonnements ultra-violets.

La figure 9 représente la courbe de sensibilité spectrale d'une cellule à cathode de thorium (a) et à cathode de tantale (b).

CELLULES COMPORTANT DES ÉLÉMENTS AMPLIFICATEURS DU COURANT PRIMAIRE

a) Cellules à gaz.- Si l'on introduit dans une cellule photoémissive un gaz à une pression de quelques centièmes de millimètre, on constate que le courant photoélectrique est fortement amplifié par le mécanisme de l'ionisation par chocs ; cette amplification, qui commence à apparaitre pour un potentiel d'environ 20 volts appliqué entre cathode et anode, augmente très rapidement avec lui. La figure 10 indique les caractéristiques du cou-

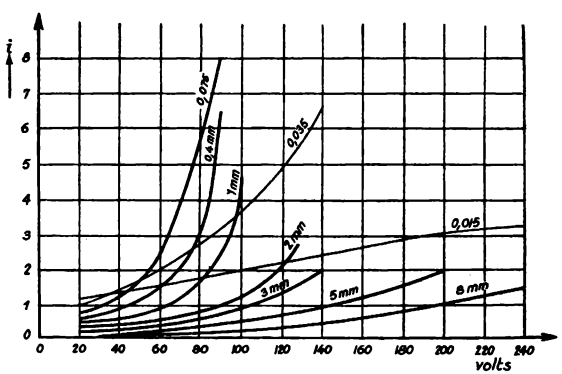


Fig. 10.- Caractéristiques courant-tension de cellules à gaz pour diverses pressions.

rant à différentes tensions, pour diverses pressions de remplissage. Si la tension appliquée est assez élevée, le courant se maintient en dehors de tout éclairement de la cellule ; on dit que l'on a dépassé le potentiel d'illumination ; la photocathode est alors très rapidement détruite. Le potentiel d'illumination diminue lorsque l'éclairement de la cellule augmente. Pour la conservation de la photocathode, on peut considérer comme dangereux

d'élever la tension de manière à réaliser une amplification supérieure à dix. Pour les cellules commerciales, il est recommandé de ne pas dépasser 90 volts avec un flux de 0,1 lumen. Dans le cas d'éclairements très faibles, on peut augmenter beaucoup la tension et obtenir des amplifications énormes, mais le régime de fonctionnement devient très instable ; on s'achemine vers la réalisation des compteurs de photons dont nous ne parlerons pas ici.

La figure 11 reproduit la courbe caractéristique d'une cellule au cœsium à remplissage gazeux.

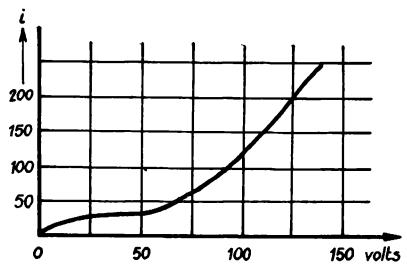


Fig. 11. - Caractéristiques courant -tension de cellules Cs à remplissage gazeux.

Lorsqu'on utilise une cellule à gaz, il faut toujours placer dans son circuit une résistance de protection d'au moins 100000 ohms, afin de limiter le courant à une valeur qui ne détruise pas la photocathode instantanément dans le cas où une illumination viendrait à se produire.

Par suite de l'inertie des ions, les cellules à gaz donnent une réponse d'autant plus faible que la fréquence du signal lumineux est plus élevée ; on peut considérer qu'à 10.000 périodes par seconde la sensibilité est déjà très diminuée. (La réponse passe à 94 % à 1.000 périodes par seconde et à 87 % à 5.000).

b) Cellules à multiplicateurs d'électrons. - Une cellule à multiplicateurs d'électrons est constituée par une photocathode qui reçoit la lumière et émet des photoélectrons, un système de dynodes qui multiplie par un nombre souvent considérable les photo-électrons libérés par la cathode et une anode collectrice (fig. 12).

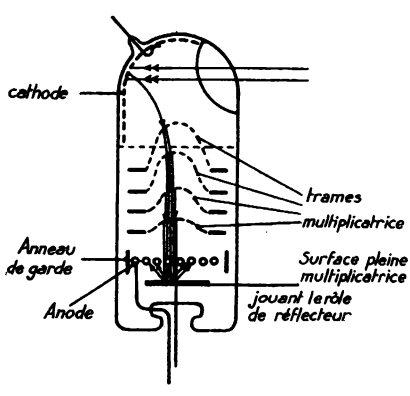


Fig. 12. - Cellule amplificatrice à grilles.

La photocathode est généralement constituée par une couche complexe renfermant un métal alcalin, souvent un alliage anti-moine - cœsium. On peut utiliser une couche complexe d'argent, oxygène et cœsium dont la sensibilité spectrale s'étend jusqu'à 1,2 μ.

La qualité d'une cellule à multiplicateurs est sous la dépendance directe du rendement quantique de la photocathode, c'est-à-dire du rapport entre les nombres d'électrons émis et des photons absorbés. De ce rendement dépend la fluctuation du courant de sortie, c'est-à-dire le plus petit flux lumineux décelable et

l'augmentation du facteur de multiplication ne permet jamais de compenser un mauvais rendement de la photocathode. Les photocathodes semi-transparentes ont toujours un rendement moins bon que les photocathodes opaques ; c'est pourquoi il est préférable d'utiliser ces dernières dans les cellules à multiplicateurs d'électrons, même si l'on doit rencontrer de plus grandes difficultés pour le guidage ou la focalisation des photoélectrons.

Le système multiplicateur doit multiplier par un facteur constant les électrons primaires qu'il reçoit sans apporter de perturbations, c'est-à-dire sans émettre d'électrons parasites. On utilise souvent un alliage d'argent-magnésium pour substance à émission secondaire, ce choix a été déterminé par les raisons suivantes : son facteur de multiplication, c'est-à-dire le nombre d'électrons secondaires émis pour un électron primaire incident est assez élevé, de l'ordre de 5 pour une tension d'accélération des électrons primaires d'environ 120 volts, il n'est pratiquement pas photoélectrique et son émission thermique à température ordinaire est nulle.

Tout système multiplicateur d'électrons doit, autant que possible, satisfaire aux conditions suivantes :

a) il doit recevoir le maximum d'électrons primaires. Pour cela, les champs de guidage des électrons primaires doivent être établis de manière à diriger ces électrons sur les cibles multiplicatrices sans les manquer. Les cibles semi transparentes faites de toiles métalliques sont à éviter : trop d'électrons traversent les mailles sans rencontrer la cible.

b) les électrons secondaires émis doivent se trouver dans un champ électrique d'extraction et non de freinage.

c) le système doit être insensible aux champs perturbateurs, par exemple au champ magnétique terrestre.

d) la réaction ionique doit être évitée, c'est-à-dire les ions libérés par ionisation à l'intérieur de la cellule ne doivent pas pouvoir atteindre la cathode, car ils provoqueraient une émission électronique qui serait multipliée par toute la chaine de multiplication.

e) l'émission froide des électrons doit être évitée, il faudra supprimer les aspérités et les gradients de potentiel élevés, ce qui conduira à donner à la cellule des dimensions assez grandes.

La figure 13 représente plusieurs types de cellules utilisant des champs de guidage électrostatique, dont une à 17 étages. Chaque dynode multiplicatrice est constituée par un anneau de métal supportant de petites lamelles d'argent magnésium, inclinées à 45°. Au-dessus du multiplicateur se trouve une grille très fine épousant la forme d'une calotte sphérique.

Ces cellules peuvent donner les performances suivantes : sensibilité de la couche : 80 à 100 microampères par lumen pour une source à la température de 2,300° K. Multiplication 80 à 100 millions (8.10^7 à 10^8) pour une différence de potentiel de 120 volts par dynode. Courant d'obscurité : 10^{-8} ampère dans ces conditions et à la température ordinaire et 5.10^{-10} amp. à

5° C. Les fluctuations du courant d'obscurité correspondent à la valeur déduite de la distribution de POISSON pour les électrons primaires de cathode qui sont d'origine thermique. Une cellule sensible à l'infra-rouge (seuil à 1,2 μ) et refroidie a pu donner une multiplication de 380 millions avec un courant d'obscurité de 3.10^{-8} ampère.

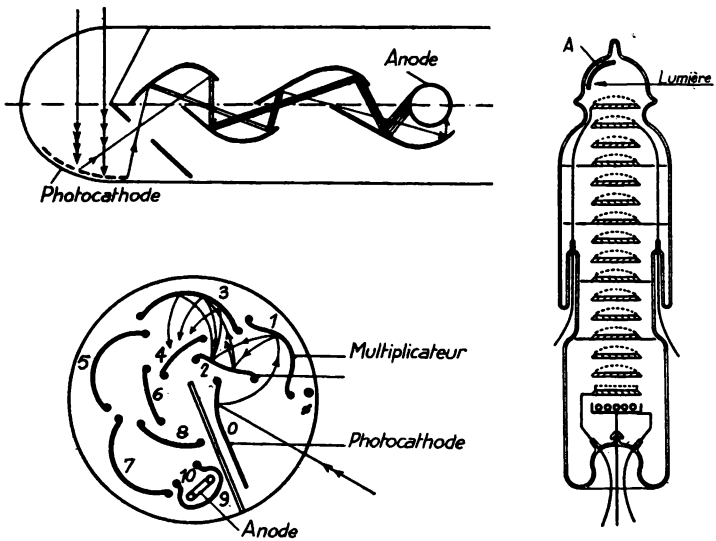


Fig. 13.- Cellules à multiplicateurs d'électrons.
Cellule à 17 étages.

Il ne faut pas croire que ces performances sont obtenues sans prendre de grandes précautions, bien que le schéma d'utilisation d'une cellule à multiplicateurs soit très simple, sa mise en oeuvre nécessite de grands soins et il est toujours difficile de se représenter l'ordre de grandeur des résistances d'isolement nécessaires. La technique des montages basse tension ne mène qu'à des déboires certains.

La source de tension qui alimente la cellule doit être particulièrement soignée ; elle doit être stabilisée à mieux que 1/10.000 car la multiplication augmentant très rapidement avec la tension, si l'on veut un instrument fidèle, il faut une tension très stable. Il faut éviter les effluves, même microscopiques,et toutes les causes de perturbations ; il faudra diminuer autant que possible les champs électriques, pour cela dimensionner très largement les chassis, éviter de placer à proximité l'un de l'autre des conducteurs portés à des potentiels très différents, éviter les potentiomètres disposés en cercle, éviter les conducteurs à l'air libre, utiliser des substances à grand isolement, tel l'alkathène.

La figure 14 représente la cellule montée dans sa boite étanche et desséchée, l'ouverture par où doit pénétrer la lumière est normalement fermée car il faut bien se garder de laisser pénétrer la lumière du jour sur la photocathode lorsque les dynodes sont sous tension. La figure 15 indique le schéma de montage électrique.

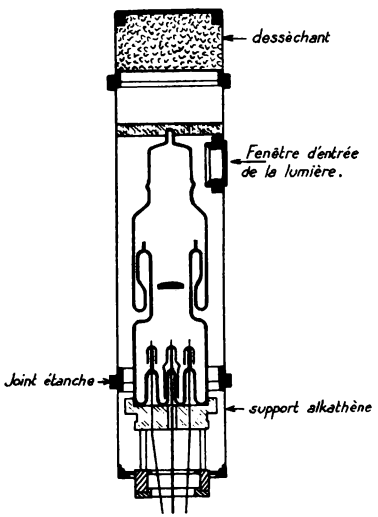


Fig. 14.- Montage de la cellule.

CHOIX D'UNE CELLULE A MULTIPLICATEURS D'ÉLECTRONS

La cellule à multiplicateurs d'électrons peut être considérée comme une cellule à vide ordinaire suivie d'un amplificateur de courant idéal qui n'apporte pas de perturbations et qui amplifie aussi bien la composante continue que les très hautes fréquences. L'emploi de la cellule à multiplicateurs s'impose dans le cas des flux lumineux très faibles ou très rapidement variables : en

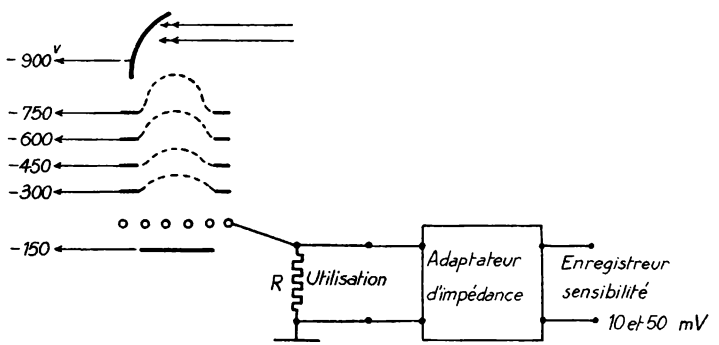


Fig. 15.- Schéma de montage électrique.

télévision, la cellule à multiplicateurs d'électrons permet la transmission des films par flyspot avec les plus hautes définitions, en chimie nucléaire, dans l'étude et le comptage des scintillations. Dans l'étude des faibles flux lumineux, la cellule à multiplicateurs trouve un grand champ d'application : études de la fluorescence, l'effet RAMAN, l'analyse spectrale, l'astronomie.

Comment choisir une cellule à multiplicateurs d'électrons, c'est-à-dire le nombre d'étages et l'amplification à réaliser ? Si

l'on veut obtenir des mesures fidèles, le premier soin est d'éviter la surcharge de la dernière dynode. Une cellule à multiplicateurs peut très bien débiter plusieurs milliampères, mais dans ces conditions, elle n'est pas fidèle. Pour un flux lumineux constant, le courant de sortie dépend des durées d'illumination et d'obscurité et on peut considérer qu'une dynode qui débite en régime continu plus de 10^{-6} ampères présente ce phénomène quel que soit évidemment le nombre d'étages de la cellule. Or une bonne cellule donnant une amplification de 10^7 à 10^8 possède un courant d'obscurité voisin de 10^{-8} ampère ; on voit donc qu'il est inutile pour l'étude des lumières permanentes d'augmenter l'amplification et le nombre d'étages, le courant d'obscurité pourrait arriver à surcharger la dernière dynode. Pour ces grandes cellules, le dispositif de sortie le meilleur est un galvanomètre sensible (10^{-11} amp. par millimètre), utilisé sans autre amplification. Il possède une grande fidélité, il n'apporte aucune perturbation propre, il n'a pas de dérive, il possède une bande passante bien définie étroite et facile à calculer d'après sa période, et sa sensibilité est largement suffisante pour analyser les fluctuations du courant de sortie de la cellule, il permet le contrôle immédiat de la surcharge des dynodes. Si le flux lumineux devient très important, il est bien préférable, au lieu de shunter le galvanomètre de diminuer l'amplification en diminuant la tension d'alimentation de la cellule. Il est nécessaire, si l'on veut utiliser la cellule avec le meilleur rendement, d'enregistrer d'une façon continue la déviation du galvanomètre. Cet enregistrement permet de déterminer des valeurs moyennes sur des intervalles de temps variables arbitraires (augmentation ou diminution des temps d'intégration à posteriori). Il est commode aussi d'utiliser des enregistreurs industriels comme ceux employés pour la mesure des températures. Il faut alors intercaler entre la cellule et l'enregistreur un adaptateur d'impédances à compensation de dérive, la résistance de charge de la cellule pouvant atteindre 50 MΩ, la sortie se faisant sous faible impédance par cathode folower (fig. 15). Si la lumière est modulée naturellement (étincelle, fluorescence, etc...) ou si elle est rapidement variable, il faut faire suivre la cellule d'un amplificateur adapté au phénomène à étudier.

On peut utiliser une cellule à grande multiplication dans les cas difficiles (astronomie, physique nucléaire) mais si l'on dispose de lumière en quantité suffisante (analyse spectrale) il est préférable de prendre une cellule à multiplication plus faible mais suffisante pour que les fluctuations SCHOTTKY de la photocathode ne soient pas masquées par l'effet JOHNSON de la résistance d'entrée.

Un critérium de bon fonctionnement est le suivant : on règle l'amplification de la cellule en agissant sur la tension d'alimentation de manière à obtenir une fluctuation de courant d'obscurité juste perceptible, on admet alors sur la photocathode un très faible flux lumineux, le galvanomètre prend une légère déviation moyenne et de grandes fluctuations doivent apparaitre, ce sont les fluctuations naturelles liées au faible nombre de photoélectrons.

CELLULES A COUCHE D'ARRÊT

Ces cellules comportent deux électrodes métalliques planes et parallèles, entre lesquelles se trouve une couche de conductibilité unipolaire ; on rencontre les cellules à oxyde de cuivre et surtout à sélénium. Lorsqu'elles sont éclairées, ces cellules

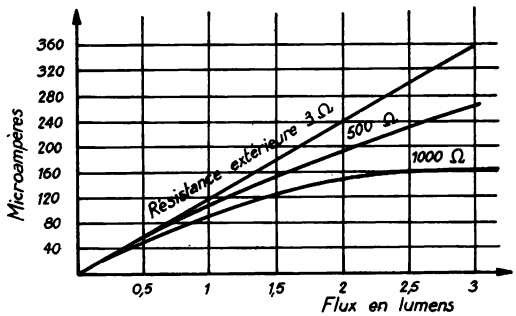


Fig. 16.- Courbe caractéristique de cellule au Se.

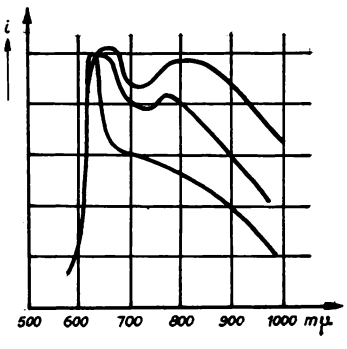


Fig. 17.- Sensibilité spectrale de cellules à couche d'arrêt.

fonctionnent comme une pile et débitent du courant dans l'instrument de mesure (microampèremètre ou galvanomètre), sans avoir besoin d'une source extérieure de tension. Le courant peut être considéré comme proportionnel au flux, si l'appareil de mesure présente une faible résistance (Fig. 16 : Cas d'une cellule au sélénium éclairée par une source à filament de tungstène à la température de 3.000° K).

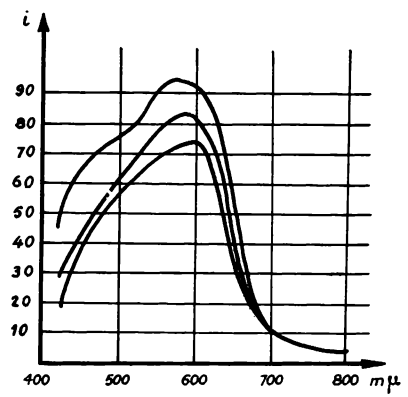


Fig. 18.- Sensibilité spectrale de cellule à Se.

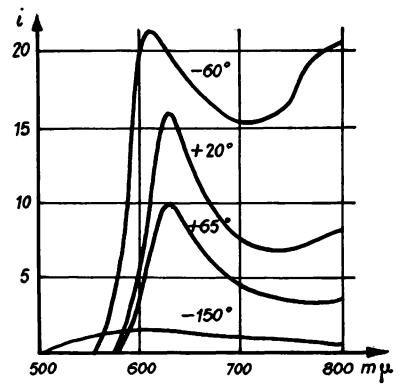


Fig. 19.- Sensibilité spectrale de cellule à Cu O.

La figure 17 représente la sensibilité spectrale de différentes cellules photoélectriques à paroi postérieure à oxyde de cui-

vre pour un même spectre d'énergie ; le seuil se trouve vers 1,4 μ.

La figure 18 donne la sensibilité spectrale de cellules au sélénium, le seuil est situé vers 0,850 μ.

La figure 19 donne la sensibilité spectrale d'une cellule à oxyde de cuivre à des températures différentes.

La figure 20 donne la sensibilité spectrale d'une cellule au sélénium à différentes températures.

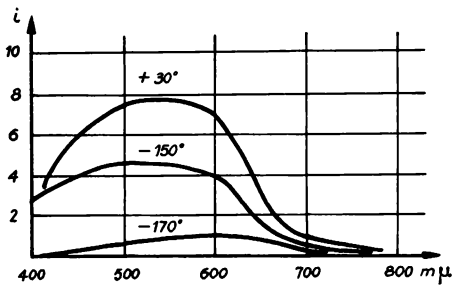


Fig. 20.- Sensibilité spectrale de cellule à Se pour diverses températures

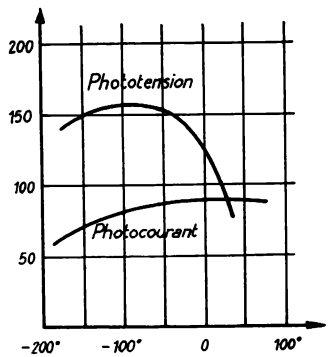


Fig. 21.- Variation avec la température des caractéristiques d'une cellule à Se.

La figure 21 indique la variation du photocourant et de la phototension d'une cellule au sélénium pour différentes températures.

La figure 22 montre les effets de la température sur la f.é.m. d'une cellule au sélénium pour différents éclairements.

La cellule à couche d'arrêt au sélénium fournit une f.é.m. d'environ 0,3 mV par lux, alors que les cellules à oxyde de cuivre donnent de 25.10^{-6} à 15.10^{-6} volts par lux.

Au point de vue de la sensibilité spectrale, il faut remarquer que l'électrode métallique qui recouvre la cellule et qui est traversée par la lumière joue un rôle essentiel par son absorption sélective.

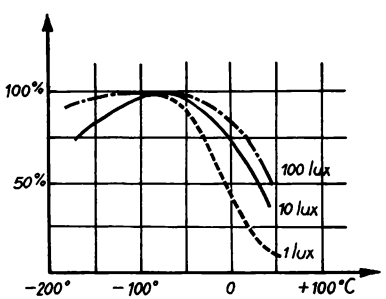


Fig. 22.- Variation avec la température de la f.é.m. d'une cellule à Se.

Il est difficile d'amplifier le courant fourni par une cellule à couche d'arrêt recevant de la lumière modulée, par suite de la grande capacité entre les électrodes, qui shunte rapidement les composantes alternatives dès que la fréquence augmente. L'inté-

rêt de ces cellules réside dans leur grande simplicité de montage et de fonctionnement ; il n'est pas logique de leur adjoindre des amplificateurs compliqués pour lesquels elles ne sont pas adaptées. Leur usage est à recommander dès que le flux lumineux est suffisant pour effectuer une mesure de courant avec précision. Elles peuvent même actionner directement des relais mécaniques ultra-sensibles avec des flux supérieurs à 2/10 de lumen.

CELLULES PHOTOCONDUCTRICES

Ces cellules, pour lesquelles la conductibilité varie avec l'éclairement, ont pris une grande importance car elles permettent d'atteindre des seuils de sensibilité vers les grandes longueurs d'onde inaccessibles aux cellules photoémissives. On peut atteindre 8 μ avec le séléniure de plomb. On obtient une sensibilité plus grande qu'avec les piles thermoélectriques et en outre un temps de réponse beaucoup plus faible. De là le grand intérêt

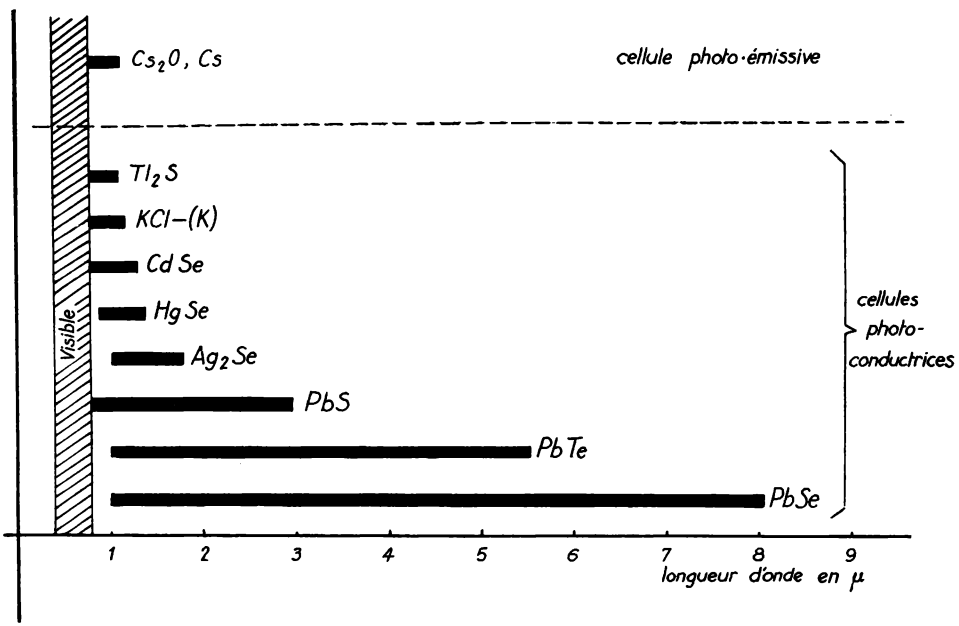


Fig. 23. - Domaine spectral de sensibilité de cellules photo-électriques de différentes natures dans l'infra-rouge.

porté aux cellules photoconductrices pour la spectroscopie à haute résolution et les enregistrements rapides.

On utilise principalement les sulfures, séléniures et tellurures de plomb, de thallium et de cadmium. La figure 23 indique le domaine spectral qui peut être exploré à l'heure actuelle par des procédés photo-électriques avec des couches sensibles de différentes natures.

CELLULES AU SULFURE DE CADMIUM

Dans le visible, l'usage des cellules photoconductrices au sulfure de cadmium tend à se répandre par suite de la très grande réponse de ces cellules. Elles sont constituées soit par des monocristaux, soit par des couches évaporées de CdS activé. Le rapport entre le courant photo-électrique, pour un éclairement plus grand que 10^{-5} W/cm², et le courant d'obscurité peut être supérieur à 10^{6}. La nature de l'activant influe sur la courbe de sensibilité spectrale. Avec l'argent, on a un maximum à 540 mμ. Avec le cuivre, le maximum se situe vers 625 mμ et le seuil à 700 mμ (fig. 24).

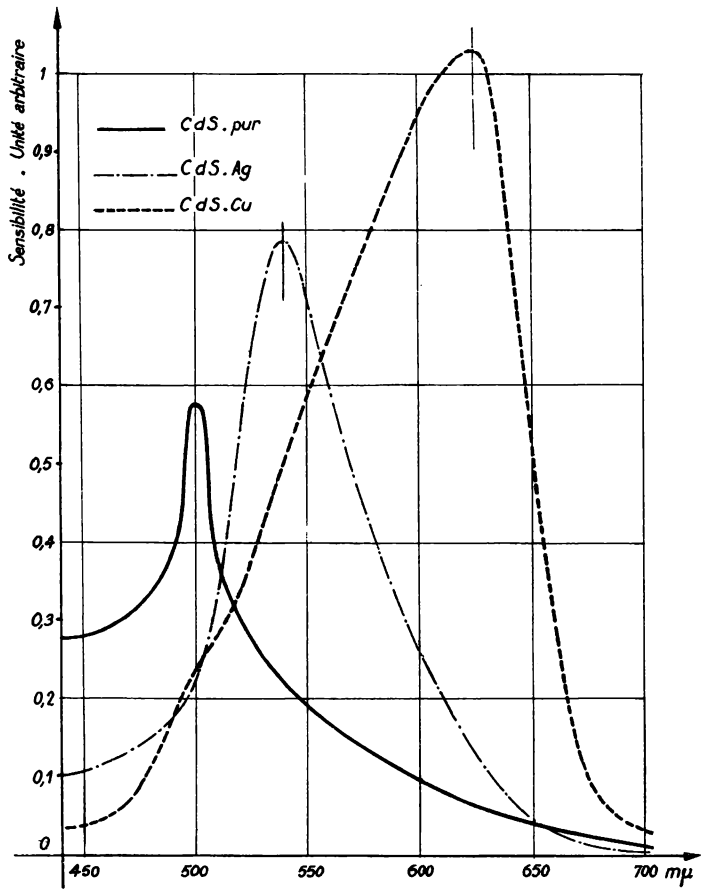


Fig. 24.- Courbe de sensibilité spectrale de CdS.

Cependant,certaines propriétés des cellules au CdS restreignent leur emploi. Elles ont une très grande inertie surtout aux faibles éclairements ($< 10^{-7}$ W/cm²). Elles conservent une "mémoire" des éclairements antérieurs auxquels elles ont été soumises, d'où la nécessité de n'utiliser ces cellules, pour des

mesures, qu'après un "repos" d'au moins 24 heures dans l'obscurité. Elles sont très sensibles aux variations de température et au-dessus d'une certaine température critique, on n'atteint pas encore l'équilibre du courant photo-électrique après plusieurs heures. Enfin, la relation flux lumineux - courant photo-électrique n'est pas linéaire.

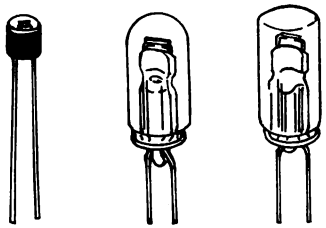


Fig. 25.- Cellules miniatures au CdS.

Pour ces raisons, il n'est pas conseillé d'utiliser les cellules au CdS pour la photométrie et l'on préfère s'adresser aux cellules photo-émissives à multiplicateurs d'électrons pour la mesure des faibles flux. Mais le CdS présente un intérêt certain pour la réalisation de relais photo-électriques. L'utilisation de monocristaux permet de constituer des relais miniaturisés (fig. 25), très sensibles et dont la constante

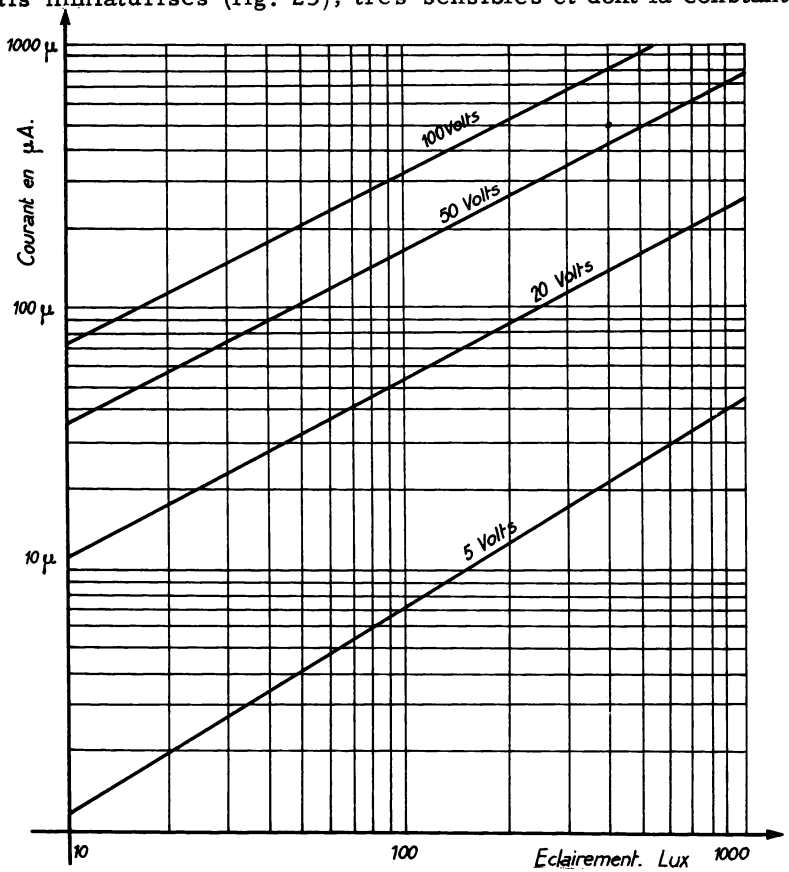


Fig. 26.- Cellules au CdS. Réponse en fonction de l'éclairement.

de temps peut être assez réduite à condition de disposer d'un éclairement assez fort. La figure 26 représente la réponse de cellules de ce genre en fonction de l'éclairement pour différentes tensions.

Avec les couches évaporées de CdS, on peut obtenir des cellules de surface assez grande pouvant dissiper la puissance nécessaire pour actionner directement des petits moteurs.

CELLULES AU SULFURE-TELLURURE ET SÉLÉNIURE DE PLOMB

Les couches photoconductrices les plus intéressantes à l'heure actuelle sont constituées par l'un des sels de plomb, sulfure, séléniure ou tellurure, déposé par évaporation dans le vide ou par précipitation chimique. Il ne sera pas question ici des traitements de sensibilisation de ces couches.

Réponse.

Soit une cellule au sulfure de plomb placée à l'entrée d'un amplificateur, en série avec une résistance de charge R_a, égale à la résistance d'obscurité de la cellule, soit V la tension continue appliquée (fig. 27).

Désignons par S le signal produit à l'entrée de l'amplificateur par une variation ΔR de la résistance de la cellule

$$S = \frac{V}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R_a}$$

Pour les flux faibles auxquels on a affaire habituellement, ΔR est proportionnel au flux incident W et on peut écrire :

$$S = \alpha W$$

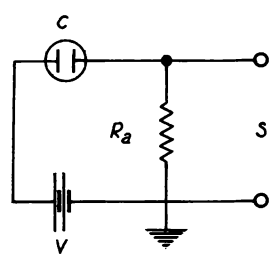


Fig. 27.
- Circuit d'utilisation.

Le facteur de proportionnalité α est la réponse de la cellule en volts par watt pour le rayonnement considéré.

La réponse α dépend des caractéristiques du montage, en particulier de la tension continue appliquée V. D'autre part, la cellule étant un recepteur sélectif, il faut définir le rayonnement W par sa composition spectrale.

Sensibilité spectrale.

Les figures 28, 29 et 30 donnent les courbes de sensibilité spectrale, pour un spectre d'énergie égale, de couches évaporées de PbS, PbTe et PbSe. En ordonnées logarithmiques, la chute de la sensibilité peu après le maximum est linéaire, cette allure des courbes de réponse spectrale est caractéristique. Si l'on prend comme limite de sensibilité la longueur d'onde $\lambda\frac{1}{2}$ pour laquelle la sensibilité a diminué de 50 % après le maximum, cette limite de sensibilité - pour une température définie de la couche - est

caractéristique du type de couche considéré. La composition de la couche, principalement son état d'oxydation, n'influe que sur la région située avant le maximum et en particulier sur la sensibilité dans le visible ; d'où la possibilité d'obtenir des cellules au PbS utilisables entre 0,6 et 2,9 μ.

Le refroidissement déplace le maximum de sensibilité et le seuil $\lambda\frac{1}{2}$ vers les grandes longueurs d'onde.

Voici les longueurs d'onde limite pour différents types de couches et à différentes températures :

température °C / type	20°	- 80°	- 180°	- 250°
PbS	2,9 μ	3,3 μ	3,7 μ	4,3 μ
PbTe			4,7 μ	6 μ
PbSe	4,7 μ	5,7 μ	7,1 μ	8,2 μ

Bruits de fond.

La courbe de sensibilité spectrale ne caractérise pas entièrement la cellule et les notions de bruit de fond et de plus petite quantité d'énergie décelable sont importantes.

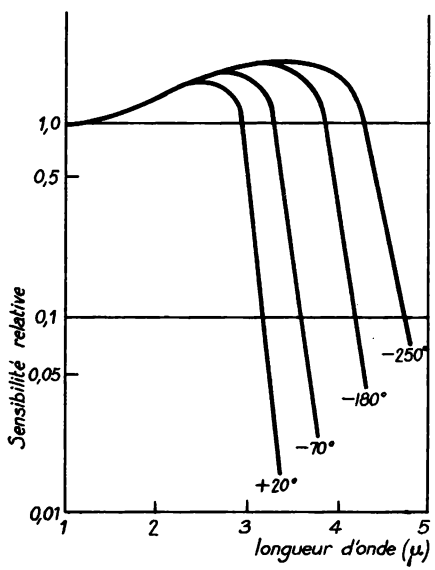


Fig. 28.- Sensibilité spectrale du PbS.

Le bruit de fond de la cellule se traduit par une tension de fluctuation B qui apparait à l'entrée de l'amplificateur dans le montage de la figure 27.

On définit conventionellement la plus petite quantité d'énergie décelable par le flux W_o qui donnerait un signal S égal à B, d'où :

$$W_o = \frac{B}{\alpha}$$

Le bruit de fond B est proportionnel à la tension appliquée V, à condition de ne pas dépasser une certaine valeur, 100 volts par exemple. Le signal S étant également proportionnel à V dans ces conditions, le plus petit flux décelable ne dépend pratiquement pas de la tension appliquée.

Le bruit de fond est également fonction de la bande passante de l'amplificateur et proportionnelle à $\sqrt{\Delta f}$ tant que la bande

passante Δf n'est pas trop large. Le bruit de fond varie aussi avec la fréquence, proportionnellement à $1/f$.

D'autre part, les cellules n'ont pas toutes la même surface sensible. Pour ces raisons, on donne souvent la valeur du seuil W_0 pour une surface de 10^{-1} cm^2 et pour une bande passante de 1 cps. Mais cette réduction à une surface et à une bande passante

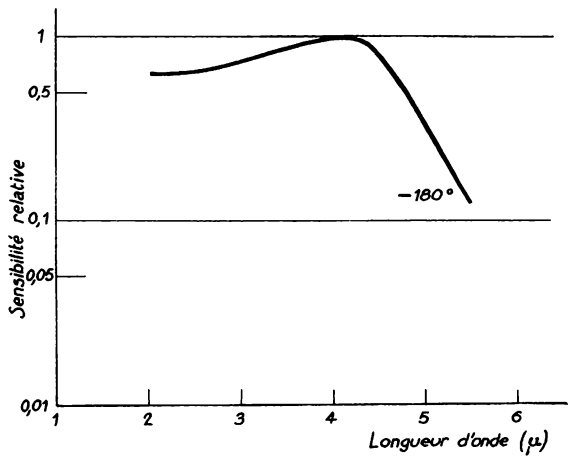


Fig. 29. - Sensibilité spectrale d'une cellule au Pb Te.

conventionnelles reste arbitraire, en particulier parce que les caractéristiques du bruit de fond dépendent de la forme de la surface sensible.

Nous avons considéré la limite d'énergie décelable d'après le rapport $\frac{S}{B}$. Pour des cellules très sensibles, non encore réalisables industriellement, mais que l'on obtient sans trop de difficultés en laboratoire, au moins 90 % de la conductibilité en l'absence du flux à mesurer est dûe au rayonnement de l'entourage. FELGETT & MOSS ont montré que dans ce cas la limite de sensibilité était imposée par les fluctuations de résistance dûes aux fluctuations des quanta incidents.

Pour des couches de PbS et de PbTe répondant à ces conditions, on a trouvé des sensibilités limites de 10^{-13} watts pour une surface sensible de 0,1 cm^2 et une bande passante de 1 cps, dans un intervalle de longueur d'onde étroit autour de la longueur d'onde correspondant au maximum de sensibilité spectrale. .

Par suite de cette limitation dûe au rayonnement de l'entourage, il est opportun de choisir autant que possible une cellule ayant une sensibilité spectrale adaptée aux mesures que l'on veut faire. Il est inutile et même nuisible d'avoir une sensibilité notable pour des longueurs d'onde supérieures à celles où l'on désire opérer.

On peut améliorer le minimun d'énergie détectable en diaphragmant les radiations à température ambiante par une dispo-

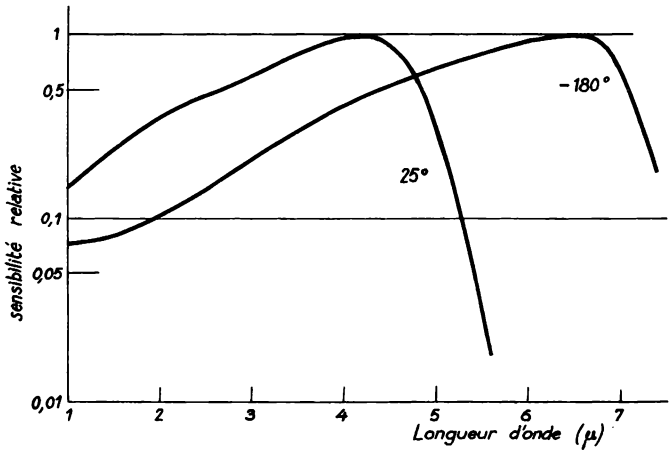


Fig. 30.- Sensibilité spectrale du PbSe.

sition appropriée de la cellule (fig. 31) d'autant plus efficace que l'angle d'ouverture admissible θ est plus petit.

Inertie.

La constante de temps est souvent définie par le temps nécessaire pour amener la réponse à $\frac{1}{e}$ de sa valeur initiale, après interruption du flux incident.

Cette constante de temps est de 30 à 100 microsecondes pour

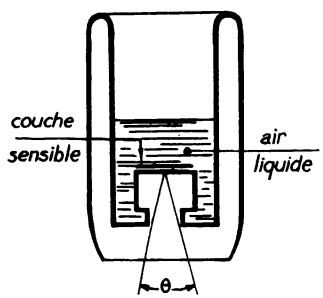


Fig. 31.- Elimination du rayonnement ambiant.

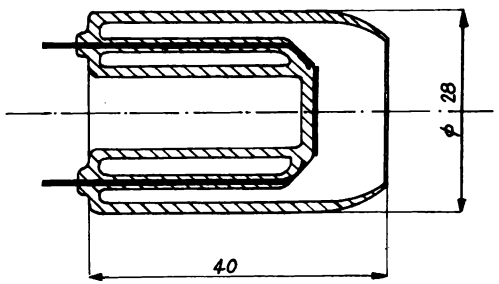


Fig. 32.- Type de cellule au PbS.

de bonnes cellules au PbS à la température ordinaire ; mais elle peut atteindre 300 à 500 microsecondes pour des cellules commerciales.

Le refroidissement augmente l'inertie (fig. 34).

Caractéristiques d'emploi.

La figure 32 représente un type de cellule au sulfure de plomb utilisable à la température ordinaire. La couche sensible est maintenue dans un vide poussé et dans ces conditions ses caractéristiques peuvent rester inchangées pendant plusieurs années.

La figure 33 indique schématiquement le montage d'une cellule photoconductrice. Le disque modulateur sera autant que pos-

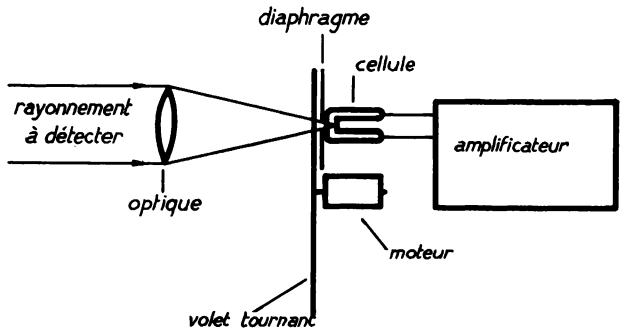


Fig. 33.- Exemple d'utilisation d'une cellule au PbS.

sible éloigné de la cellule pour éviter l'effet dû au rayonnement propre des parties pleines du disque. Il est préférable chaque fois qu'on le peut de moduler le rayonnement près de la source, par exemple avant la fente d'entrée d'un spectrographe.

Pour le choix de la fréquence de modulation à adopter et de la bande passante de l'amplificateur, il faut se référer aux caractéristiques d'inertie et de bruit de fond :

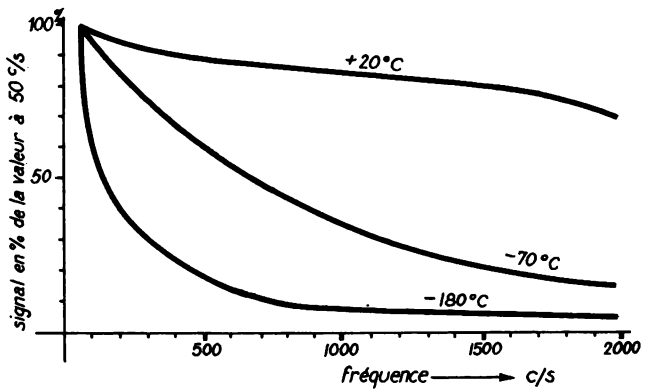


Fig. 34.- P b S - Variation du signal en fonction de la fréquence et de la température.

La figure 34 donne des courbes type de variation de la réponse en fonction de la fréquence de modulation.

La courbe de la figure 35 montre la variation du bruit de fond, exprimé en μvolt, en fonction de la fréquence pour une bande passante constante de 1 cps.

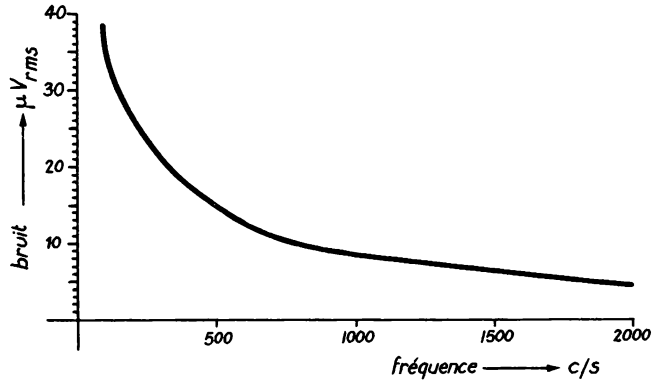


Fig. 35.- PbS - Bruit de fond en fonction de la fréquence (bande passante = 1 cps , i = 30 μ A).

Les figures 36 et 37 montrent l'influence, sur le rapport $\frac{S}{B}$, de la bande passante de l'amplificateur et de la position de cette bande dans le spectre des fréquences. On voit également sur ces

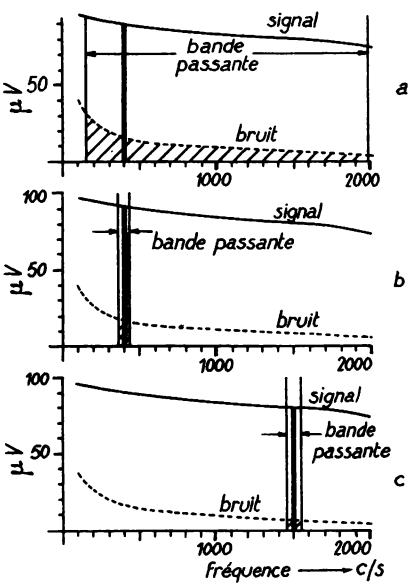


Fig. 36.- Cellule au PbS (+ 20°) Rapport signal/bruit en fonction de la fréquence et de la bande passante

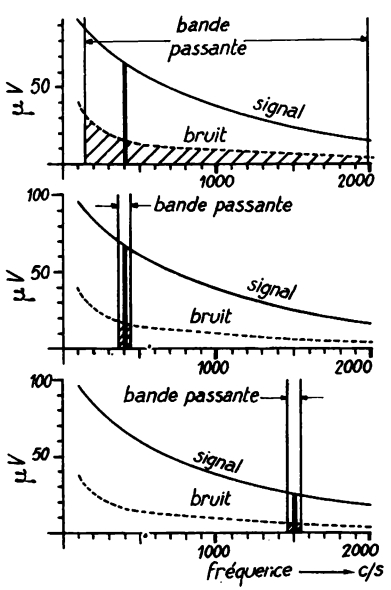


Fig. 37.- Cellule au PbS (- 78°) Rapport signal/bruit en fonction de la fréquence et de la bande passante

figures comment intervient l'inertie. La figure 36 est relative à une cellule utilisée à la température ordinaire ayant une inertie

plus faible que la cellule de la figure 37 refroidie par CO_2 solide. Dans le cas de la plus faible inertie, on a intérêt à utiliser une fréquence de modulation assez élevée, 1500 à 2000 cps, alors que dans l'autre cas, le gain obtenu par la réduction du bruit en augmentant la fréquence est masqué par la réduction du signal dûe à une constante de temps plus grande.

Il faut tenir compte de la variation de la conductibilité avec la température dans les semiconducteurs. L'efficacité des cellules varie beaucoup en fonction de la température. Le refroidissement augmente la sensibilité et l'échauffement la diminue. Il faut donc éviter de placer la cellule à proximité de lampes, rhéostats chauds, etc... Quand on opère à la température ordinaire, il est bon de prévoir un dispositif maintenant la température de la couche constante à 1 ou 2° près. Quand on utilise le refroidissement par exemple avec un crayon de glace carbonique ou par l'air liquide, il faut s'assurer que l'agent réfrigérant reste en contact avec le support de la couche sensible sans interposition d'un matelas gazeux isolant.

On peut se servir d'un cylindre de neige carbonique comprimée à la presse dans un moule de dimensions appropriées. Les

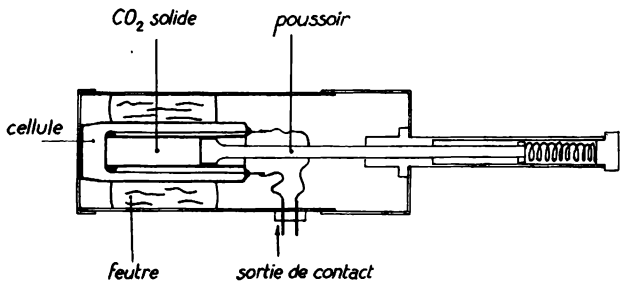


Fig. 38.- Dispositif de refroidissement par CO_2 solide.

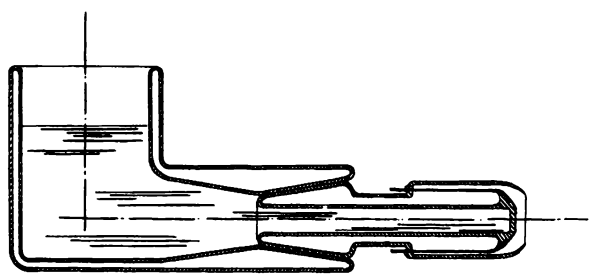


Fig. 39.- Dispositif pour le refroidissement par air liquide.

cellules ont une plus grande longueur que celle représentée par la figure 32, pour recevoir une réserve suffisante de CO_2 solide.

La figure 38 représente un blindage métallique pour une cellule au sulfure de plomb, muni d'un piston à ressort qui main-

tient continuellement le crayon de CO_2 contre le fond de la cellule. On peut aussi mélanger à la neige carbonique les produits organiques de façon à obtenir une gelée adhérente aux parois de la cellule.

Pour le refroidissement par l'air liquide, on utilise souvent des cellules prolongées à la partie arrière par un rodage qui s'engage dans le rodage correspondant d'un vase DEWAR servant de réserve (fig. 39).

Le choix des cellules est important. Avec des cellules non sélectionnées, on ne peut guère attendre plus de sensibilité qu'avec une bonne thermopile. Seules les cellules satisfaisant à la condition de FELGETT & MOSS, exposée ci-dessus, conviennent pour les mesures où l'on recherche une grande sensibilité.

CELLULES AU PbS

Ces cellules sont le plus souvent utilisées à la température ordinaire. A cette température, la limite de sensibilité spectrale est 2,9 μ, et l'inertie est inférieure à 10^{-4} μ seconde. Pour une fréquence de modulation de 800 cps et une bande passante de quelques cps on a environ 200 fois plus de sensibilité qu'avec une pile thermo-électrique dans la bande de 2 à 2,8 μ. Pour certaines cellules, le refroidissement avec un crayon de glace carbonique multiplie le rapport $\frac{S}{B}$ par 10 environ, mais l'inertie peut atteindre 10^{-4} μ seconde.

CELLULES AU PbTe

Le tellurure de plomb permet d'atteindre des longueurs d'onde plus grandes que le PbS. Il est nécessaire de refroidir la cellule avec l'air liquide. A cette température, la réponse est encore la moitié du maximum à 4,75 μ. On peut encore utiliser une fenêtre en verre pour cette longueur d'onde à condition de souffler cette fenêtre sous une faible épaisseur, environ 0,03 mm. La constante de temps est en général plus faible que celle des cellules au PbS. On a cité des gains de sensibilité d'environ 500 par rapport à la thermopile dans la région de 3 μ.

CELLULES AU PbSe

Ce n'est guère qu'en 1951 (GIBSON, LAWSON & MOSS) que l'on a découvert que le séléniure de plomb avait un seuil de sensibilité spectrale plus éloigné vers les grandes longueurs d'onde que le tellurure de plomb. Les valeurs de $\lambda_{\frac{1}{2}}$ sont les suivantes : à 20° C, 4,7 μ ; à - 180° C, 7,1 μ ; à - 250° C, 8,2 μ. Pour ces longueurs d'onde, l'absorption du verre est trop grande et on utilise des fenêtres en "périclase" (MgO) en lames clivées.

La constante de temps est très réduite, quelque micro secondes. La sensibilité est nettement inférieure à celle des cellules au PbS et au PbTe dans leur donaine de sensibilité, mais reste supérieure à celle des thermopiles.

PHOTOTRANSISTORS

Ces cellules, dans lesquelles on utilise l'effet photovoltaique des jonctions p - n dans le germanium et le silicium, prennent un certain développement.

Dans ces cellules,le rendement quantique est voisin de l'unité. Le domaine spectral va du visible à la longueur d'onde limite de 1,8 μ (cette limite est la même que celle de la photoconductibilité).

On peut utiliser l'effet photo-voltaique directement. On peut aussi appliquer une tension à la cellule. Dans ce cas,on constate que la courbe courant/tension présente une saturation, atteinte pour quelques volts.

A l'heure actuelle, les sensibilités rencontrées sont environ de 30 mA/Lumen pour une lampe à 2.400° K. et le courant d'obscurité de quelques microampères à la température ambiante.

On assimile le processus à celui du transistor en considérant que la lumière jour le rôle de l'émetteur en injectant des paires électrons-trous.

Le bruit de fond de ces cellules est beaucoup plus élevé que celui de cellules à multiplicateurs d'électrons ayant la même sensibilité.

La cellule à jonction est de petites dimensions et enrobée dans une matière plastique.

MESURES ET UTILISATION DES COURANTS PHOTOÉLECTRIQUES

MESURES GALVANOMÉTRIQUES

Ce sont les mesures les plus simples ; elles présentent le grand avantage d'être toujours correctes, car la chute de tension dans l'instrument est pratiquement négligeable et le point de fonctionnement de la cellule est bien connu. Le montage est celui de la figure 40. On ne doit pas dépasser 90 v. pour les cellules à gaz. On peut mettre un pôle à la terre. Une résistance de sécurité d'environ 10.000 Ω est indispensable. Le galvanomètre peut avoir une grande résistance interne (elle est encore petite devant celle de la cellule). On peut mesurer des courants photoélectriques jusque vers 10^{-11} ampères en tenant compte du courant d'obscurité (la cellule n'étant pas éclairée).

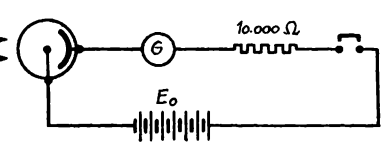


Fig. 40.- Cellule montée avec un galvanomètre.

Pour des mesures moins précises, on peut employer des appareils à pivots (microampèremètres), on peut considérer qu'une cellule est bien éclairée lorsqu'elle reçoit quelques centièmes de lumen, une cellule à gaz ordinaire donnant 100 μA/lumen débitera quelques microampères, ce qui fixe la sensibilité de l'instrument à utiliser.

MESURES ÉLECTROMÉTRIQUES

L'électromètre permet de mesurer les courants photoélectriques les plus faibles. Les méthodes de mesure que nous allons décrire et les difficultés rencontrées s'appliquent aussi à la lampe électromètre, mais l'emploi de ces lampes comporte encore d'autres difficultés supplémentaires (dérive, instabilité, etc.) qui font souvent oublier les difficultés de principe que nous allons signaler. C'est pourquoi nous ne saurions trop recommander l'emploi de l'électromètre pour contrôler les méthodes employées ou pour effectuer les mesures de précision. Et c'est encore avec un électromètre du genre Lindemann ou Hoffmann que l'on peut mesurer les plus faibles courants photoélectriques.

1° Cas idéal.- La cellule ne présente pas de courant d'obscurité, elle est très bien isolée, c'est une cellule à vide, la tension d'alimentation est suffisamment élevée pour que la tension aux bornes de la cellule soit toujours dans le domaine de saturation. Dans ces conditions, si la cellule reçoit un flux lumineux constant, le courant photoélectrique reste constant. Le montage employé peut être celui de la figure 41. On vérifie que l'isolement est bon : la cellule étant enlevée et l'interrupteur 1 ouvert, l'électromètre doit rester au repos, une charge apportée à l'électromètre doit rester constante.

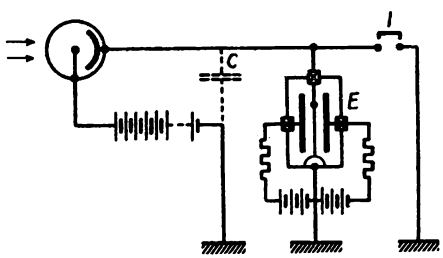


Fig. 41.- Cellule montée avec un électromètre à fil.

Le courant d'obscurité est nul si, la cellule étant en place et dans l'obscurité et l'interrupteur 1 ouvert, l'électromètre ne dévie pas. On peut utiliser deux méthodes :

a - On lit, dans un intervalle de temps Δt donné par la battement d'un pendule la déviation en volts de l'électromètre, Δe. C étant la capacité chargée (cellule, électromètre et condensateur si on l'a mis en place), on a : $i = C. \frac{\Delta e}{\Delta t}$.

b - A l'aide d'un chronomètre, on mesure le temps mis par l'électromètre pour prendre une charge donnée, représentée par une déviation Δe de l'électromètre on a : $i = C. \frac{\Delta e}{\Delta t}$

2° Cas d'une cellule à vide ayant un courant d'obscurité.- C'est généralement le cas. On a donc à considérer un courant

photoélectrique constant i et un courant d'obscurité i', qui peut être constant aussi s'il est dû à l'émission thermique de la cathode (la température de la cellule ne varie pas) ou qui peut être variable s'il est dû à un mauvais isolement ou à un mauvais vide, car i', dans ce cas, varie avec la tension aux bornes de la cellule, qui diminue pendant la mesure avec la charge de l'électromètre. D'où l'intérêt d'avoir des cellules bien isolées et vidées.

En supposant que le courant d'obscurité est créé par une résistance fictive R placée aux bornes de la cellule, on peut calculer la valeur de cette résistance qui engendrerait dans les mesures une erreur de 1 % par exemple. On trouve $1/100 = \frac{1}{2}\frac{\Delta t}{RC}$, Δt étant le temps de charge de l'électromètre et C la capacité. Pour $C = 10^{-10}$ F, et $\Delta t = 10$ s., $R = 5.10^{12}$ ohms. Le courant d'obscurité est donc très rarement négligeable. Pour en tenir compte, on peut montrer que la charge de l'électromètre, exprimée en volts, est :

$$\Delta e = \frac{E_0}{R}\frac{\Delta t}{C} + i\frac{\Delta t}{C}$$

E_0 étant la tension d'alimentation, E_0/R est le courant d'obscurité initial. On déterminera donc dans l'obscurité la quantité $\Delta e' = \frac{E_0}{R} \cdot \frac{\Delta t}{C}$, qui, retranchée de Δe, donnerai $\frac{\Delta t}{C}$ que l'on cherche.

3° Cas des cellules à gaz ou des cellules à vide en dehors du domaine de saturation.- Dans ce cas, l'éclairement de la cellule étant constant, le courant photoélectrique i varie pendant toute la mesure, car la tension aux bornes de la cellule diminue avec la charge de l'électromètre. La méthode à utiliser consiste alors à mesurer le temps Δt pendant lequel l'électromètre se charge à une tension toujours constante Δe ; dans ces conditions, on peut montrer que Δt est inversement proportionnel au flux reçu par la cellule, et ceci à condition que l'intensité du courant photoélectrique i soit, pour une tension donnée et invariable sur la cellule, proportionnelle au flux lumineux, ce qui généralement est réalisé.

Si l'on mesurait pour un temps fixé Δt la variation de potentiel Δe de l'électromètre, le résultat serait plus difficile à interpréter et à utiliser.

Il y a toujours intérêt à diminuer cette chute de tension nuisible aux bornes de la cellule pendant la mesure, donc à prendre une capacité C assez grande et un électromètre très sensible.

MÉTHODE DE LA RÉSISTANCE DE CHARGE

Le montage à utiliser est celui de la figure 42. La résistance de charge R est très élevée, de l'ordre de 10^{10} ohms et l'électromètre mesure la chute de tension dans cette résistance.

1° Cas d'une cellule à vide utilisée dans le domaine de saturation.- La chute de tension mesurée étant Δe, le courant

photoélectrique est $i = \frac{\Delta e}{R}$. Si la cellule présente un courant d'obscurité i', $\Delta e = (i + i') R$. Mais il faut vérifier que i'R soit assez petit pour être certain de rester dans le domaine de saturation ; on peut alors effectuer la correction $\Delta e' = i' R$ mesurée dans l'obscurité.

2° Cas d'une cellule à gaz ou d'une cellule à vide en dehors du domaine de saturation.- Il faut considérer la courbe donnant le courant photoélectrique i en fonction de la tension appliquée E

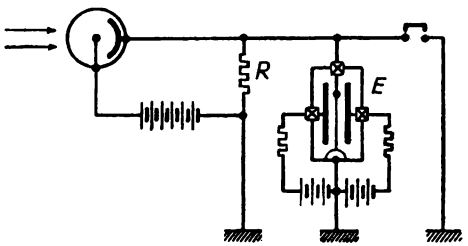


Fig. 42.- Méthode de la résistance de charge

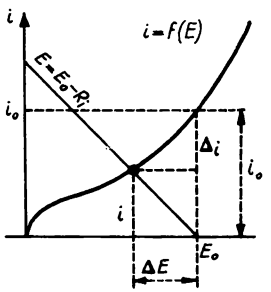


Fig. 43.- Fonctionnement d'une cellule non saturée

sur la cellule (fig. 43), le flux lumineux étant constant. Le point de fonctionnement s'établit à l'intersection de cette courbe et de la droite de charge $E = E_0 - Ri$, E_0 étant la tension d'alimentation. Le courant photoélectrique devient $i = i_0 - \Delta i$ et la tension aux bornes de la cellule $E_0 - \Delta E$, avec $\Delta E = Ri$.

En première approximation, considérons la caractéristique comme rectiligne dans l'intervalle ΔE. La pente $\frac{\Delta i}{\Delta E} = p$ est connue.

On a donc : $i = i_0 - \Delta i$

En faisant apparaitre $p = \frac{\Delta i}{\Delta E}$, on a

$$i = i_0 - p\ \Delta E \quad \text{ou} \quad i = i_0 \left(1 - \frac{p}{i_0}.\ \Delta E\right).$$

Pour avoir une mesure correcte, il faut donc que le terme $p . \Delta E$ soit négligeable. Or p est connu d'après la courbe caractéristique ; prenons par exemple sa valeur égale à 2.10^{-2} ; si l'on veut faire une erreur inférieure à 1/100, il faut dans ces conditions :

$$\frac{p}{i_0}.\ \Delta E < \frac{1}{100} \quad \text{ou} \quad \Delta E < 0{,}5\ \text{v}.$$

Cela fixe ou le plus grand flux à mesurer, ou le choix de la résistance R ou encore le point de fonctionnement sur la caracté-

ristique qui détermine la quantité $\frac{p}{i_0}$ et qui dépend aussi de E_0.

Jusqu'ici, nous n'avons pas considéré le courant d'obscurité; si sa valeur est i', la chute de tension aux bornes de la cellule est alors :

$$\Delta E = R\ (i + i')$$

et, comme précédemment, c'est la quantité $\frac{p}{i}$. ΔE qui donnera l'erreur que l'on peut commettre dans les conditions où l'on opère. Cette méthode de la résistance de charge est moins précise que les méthodes décrites plus haut ; elle est cependant très employée, surtout avec les lampes électromètres, elle permet de suivre facilement des courants photoélectriques variables ; on utilise souvent plusieurs résistances de charge de valeurs différentes que l'on peut connecter individuellement selon les besoins (fig. 44), mais il faut veiller, au cours de ces changements, à rester dans les conditions de fonctionnement correctes que nous avons précisées.

Remarque.- Au lieu de mesurer la chute de tension aux bornes de la résistance, on peut, par un dispositif potentiométrique, compenser cette chute de tension, l'électromètre ne jouant le rôle que d'appareil de zéro tandis que le dispositif potentiométrique fournit la mesure. Le schéma du montage est représenté figure 45.

La résistance du potentiomètre doit être négligeable (quelques centaines d'ohms) devant la résistance de charge R_0. E_0 est la tension d'alimentation normale de la cellule, e la tension auxi-

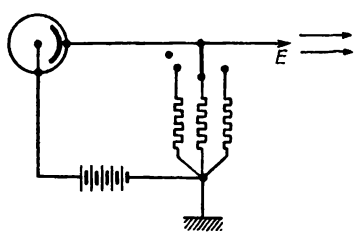


Fig. 44.- Montage avec plusieurs résistances de charge.

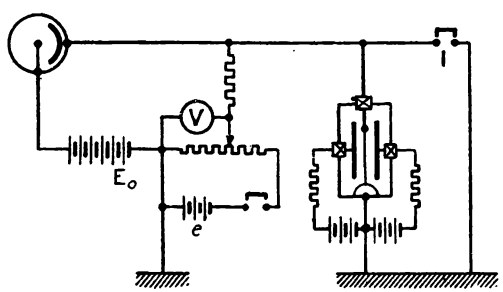


Fig. 45.- Montage potentiométrique.

liaire de quelques volts. Cette méthode est remarquable par sa précision et sa sécurité, car il n'y a plus lieu de tenir compte des conditions de fonctionnement, la correction de courant d'obscurité s'effectue très simplement ; malheureusement, elle ne se prête pas à l'étude des flux variables ou à l'enregistrement (microphotomètres).

UTILISATION DE TUBES A VIDE

Les courants traversant les cellules photoélectriques sont très souvent utilisés par l'intermédiaire de lampes électromètres ou d'amplificateurs contenant des tubes à vide.

On trouvera dans le vol. II, de cet ouvrage, les renseignements sur les lampes électromètres, dont l'emploi avec les cellules photoélectriques ne soulève pas de problèmes particuliers.

Le chapitre X du présent volume contient les renseignements sur les circuits amplificateurs applicables ici.

RELAIS ÉLECTRO-LUMINEUX

Dans un grand nombre d'applications (décomptes d'objets, ouverture automatique de portes, affichage de la vitesse de l'automobile qui entre dans une zone dangereuse, signalisation, etc.), la cellule photoélectrique fonctionne par tout ou rien. Pour déclencher les relais assurant l'automatisme des opérations, on peut utiliser des amplificateurs simples, qui devront cependant posséder une sensibilité et une fidélité suffisante ; on est aidé dans cette voie par le fait que l'on peut se donner le flux lumineux tombant sur la cellule et le prendre généralement assez grand.

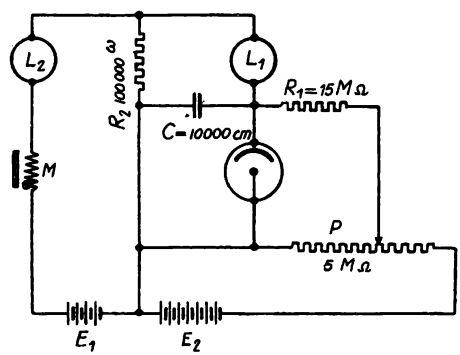


Fig. 46. - Montage de relais lumineux à batterie

L'utilisation de lampes à décharge gazeuse (lampe à argon ou à néon) conduit à des solutions très simples. La figure 46 reproduit un montage facilement réalisable avec des lampes veilleuses du commerce. L'alimentation se fait à partir d'une batterie de piles, le condensateur C = 10.000 cm. se charge par l'intermédiaire de la grande résistance R_1 = 15 MΩ. Si la cellule est éclairée, sa résistance est petite devant R_1, la tension aux bornes du condensateur est très faible, mais si l'éclairement vient à cesser, le condensateur se charge et la tension monte suffisamment pour qu'il puisse se décharger dans la lampe L_1. Le courant de décharge ainsi produit provoque dans la résistance R_2 un appoint de tension suffisant pour amorcer la lampe L_2 qui restera allumée et dont le courant est suffisant pour actionner le relais mécanique M. Le système est donc irréversible, il faut, lorsque l'éclairement de la cellule est revenu, le réamorcer en coupant un instant le courant dans L_2.

La tension E_1 est prise légèrement inférieure à la tension d'amorçage de la lampe L_2, tandis que la tension E_2 est supérieure à la tension d'amorçage de L_1 ; on choisit le point optimum

de fonctionnement avec le potentiomètre P de grande résistance. L'intérêt de ce dispositif réside dans le fait qu'il ne consomme aucun courant à l'état de veille, c'est-à-dire tant que la cellule reçoit un flux lumineux suffisant. La batterie de pile a ainsi une durée presque illimitée. La figure 47 donne, à titre d'exemple,

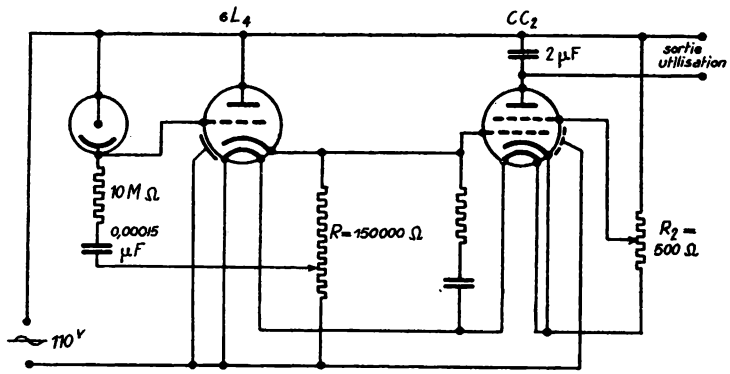


Fig. 47.-Montage de relais lumineux sur secteur alternatif.

un relais ne comportant ni redresseur ni transformateur d'alimentation et fonctionnant directement sur le secteur. La résistance R = 150.000 ohms est la seule valeur critique à ajuster pour assurer un bon fonctionnement. Lorsque la cellule est éclairée, le relais débite facilement 20 mA, ce qui est largement suffisant pour actionner avec sécurité un relais mécanique très ordinaire.

L'alimentation directe en courant alternatif d'une cellule commandant des tubes à grille présente l'avantage d'une grande simplicité, mais il faut, dans ces montages, faire grande attention aux phases des différentes tensions. On a souvent affaire à des circuits constitués comme l'indique la figure 48.

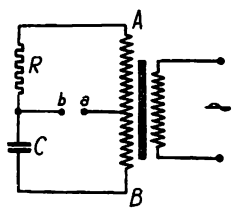


Fig. 48. - Schéma d'alimentation secteur.

Le transformateur est alimenté par le courant du secteur et l'on cherche la tension aux bornes de a b. Le diagramme de la figure 49 en fournit la solution. Si l'impédance $\frac{1}{C\omega}$ du condensateur C est grande devant R, la tension de b est en phase avec celle de A ; si l'impédance $\frac{1}{C\omega}$ est petite devant R, la tension du point b est à 180° de celle de A.

De la figure 48, passons au schéma de la figure 50. La cellule étant éclairée, on choisit un condensateur C dont l'impédance soit grande devant la résistance de la cellule, la tension de grille est alors en phase avec la tension d'anode, ces deux élec-

trodes seront donc positives en même temps et le tube débitera un courant maximum dans R_a. Si la cellule n'est pas éclairée, son impédance devient grande devant $\frac{1}{C\omega}$ et la tension grille se trouvera décalée de 180° sur celle de A. Dans ce cas, une électrode sera toujours négative, le tube ne débitera aucun courant.

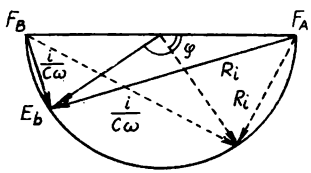


Fig. 49.- Diagramme de tension.

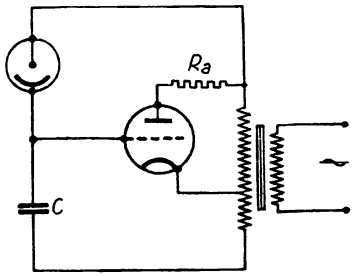


Fig. 50.- Montage de cellule sur secteur.

Suivant l'éclairement de la cellule, les phases des tensions plaque et grille s'écartent ou se rapprochent plus ou moins et on obtient une régulation continue du courant débité par le tube.

Si l'on utilise une cellule à gaz, il faut s'assurer que les tensions de pointe n'illuminent pas la cellule. Il faut bien prendre soin de réunir l'anode de la cellule au côté anode du tube. Celui-ci peut être un thyratron et l'intensité du courant débité dans R_a peut être importante. R_a peut être, par exemple, la résistance d'appoint d'un four électrique dont on veut maintenir la température constante. La cellule est alors contrôlée par le flux lumineux envoyé par un galvanomètre commandé par le couple qui mesure la température du four.

EMPLOI DES CELLULES PHOTOÉLECTRIQUES EN PHOTOMÉTRIE

La cellule photo - électrique est de plus en plus employée dans les mesures où intervient l'énergie rayonnante (photomètres, calorimètres, posemètres, densitomètres, microphotomètres, spectrographie, etc.). Convenablement employée, elle se prête à des mesures rapides, très précises et très sûres, mais il ne faut pas faire sur ses propriétés des hypothèses par trop avantageuses. La mise au point de cette question sortirait du cadre de cet exposé et nous voulons rappeler ici les précautions à prendre et les erreurs à éviter.

En aucun cas, on ne peut prendre une cellule comme étalon photométrique. La sensibilité d'une cellule n'est pas constante dans le temps, même si elle n'est pas utilisée et si elle est conservée à l'obscurité ; nous avons vu des cellules photoémissives au cœsium dont la sensibilité avait augmenté de près de 20 % en

quelques mois, d'autres avaient diminué de près de 50 %. La sensibilité spectrale et le seuil varient aussi avec le temps. Les cellules à couche d'arrêt semblent plus stables, mais il faut se méfier des effets de la température et de l'humidité. Il ne faut jamais admettre que la sensibilité de la photocathode est uniforme sur toute la surface ; il existe des variations considérables pouvant aller de 1 à 10. Au cours des mesures, il faut toujours craindre une fatigue ou une augmentation de la sensibilité ; pour les cellules à multiplicateurs, il n'est pas rare que la réponse augmente dans les premières secondes ou minutes de fonctionnement. Dans les appareils de mesure, il est toujours recommandé d'utiliser des cellules à vide et de travailler franchement dans le domaine de saturation, les résultats donnés par les cellules à gaz sont toujours plus difficiles à utiliser (voir le chapitre sur les mesures électrométriques). Pour graduer la lumière, les procédés du coin neutre ou mieux du carré de la distance donnent des résultats satisfaisants ; il faut se méfier des secteurs tournants dont la fréquence de modulation peut jouer un rôle important. Dans le cas de cellules photoémissives, c'est le flux qui détermine la grandeur de l'émission ; il n'y a cependant pas intérêt à éclairer des surfaces trop petites de la photocathode, en raison des erreurs provenant des variations locales de la sensibilité. Avec des cellules photorésistantes, il faut éclairer la plus grande surface de la couche sensible. Dans les mesures de précision, on utilisera la cellule pour comparer une densité à une autre densité, un rayonnement à un autre rayonnement. Les appareils qui donnent des indications photométriques directement, comme les posemètres utilisés en photographie, ne peuvent prétendre fournir que des ordres de grandeur, à condition de les contrôler de temps à autre.

Pour l'élimination des causes d'erreurs rencontrées dans l'utilisation des cellules à la microphotométrie, voir par exemple A. Lallemand, Revue d'Optique, t. 15, 1936, 109-114.

Dans les mesures des faibles flux lumineux et en particulier en astronomie, la cellule photoélectrique prend un développement de plus en plus grand, qui la fait rivaliser avec la plaque photographique. Elle possède sur la plaque photographique l'avantage d'une sensibilité spectrale beaucoup plus étendue, la proportionnalité du courant au flux lumineux augmente la précision et la rapidité des mesures ; malheureusement les étoiles faibles ne sont accessibles que dans les grands télescopes et on ne peut étudier qu'une seule étoile à chaque observation.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages fondamentaux

A.L. HUGES et L.R. DUBRIDGE - Photoelectric phenomena - International Serie of Physics - Mac Graw-Hill Book C° 1932

V.K. ZWORYKIN and E.G. ROMBERG - Photoelectricity and its applications - John Wiley and Sons, New-York, 1949.

F.B. WOOD - Astronomical Photoelectric Photometry - American Association for the advancement of Science - 1515 - Massachusetts Avenue, N.W. Washington - 1953.

Périodiques

Journal de Physique, Paris.

Mesures, Paris

Review of Scientific Instruments, New-York.

Electronics, New-York.

Astrophysical Journal, Chicago.

Journal optical Soc. Am., Lancaster Pensylvania

HUITIÈME CHAPITRE

ENREGISTREMENT

par

H. GONDET

Directeur général des Laboratoires du C.N.R.S. de Bellevue

ENREGISTREMENT

Avantage de la méthode 419
Des différents procédés d'enregistrement 420
ENREGISTREMENT DES PHÉNOMÈNES RELATIVEMENT LENTS 422
Enregistreur à crayon et à style sur papier paraffiné 424
Enregistrement graphique sur film 425
Inscripteur chimique 426
Enregistreur photographique 426
Visualisation de la courbe 428
Enregistreur courant après son zéro 429
Enregistreurs asservis 430
ENREGISTREMENT DES PHÉNOMÈNES RAPIDES 431
Les oscillographes 431
Enregistreur automatique 432
Enregistreur muni d'un ou de plusieurs oscillographes de fréquence élevée à miroirs de très petites dimensions (de l'ordre du millimètre carré de surface) 435
Enregistrement des phénomènes mécaniques assez rapidement variables 438
Enregistrement du temps 455
Enregistrement des temps très courts (inférieurs au 1/10.000 seconde) 458
Dispositif d'enregistrement permettant l'inscription d'un grand nombre de paramètres sur la même bande 460
ENREGISTREMENT DES PHÉNOMÈNES TRÈS RAPIDES 462
Enregistrements photographiques directs 462
Enregistrement de mouvements mécaniques rapidement variables - stroboscopie 466
Enregistrement à l'oscillographe cathodique 468

HUITIÈME CHAPITRE

ENREGISTREMENT

PROCÉDÉS D'ENREGISTREMENT

AVANTAGES DE LA MÉTHODE

Si les procédés d'enregistrement se substituent de plus en plus dans les laboratoires aux simples lectures à vue, c'est que, s'ils conduisent à un appareillage un peu compliqué, ils présentent par contre sur la notation par points de tels avantages que tous les chercheurs sont maintenant d'accord pour les adopter chaque fois que des raisons budgétaires ne viennent pas en limiter l'emploi.

L'enregistrement d'un phénomène en remplacement de son examen visuel permet, en effet, de conserver un test quelle que soit sa durée, test sur lequel tous les accidents qui auraient pu ne pas être remarqués à l'oeil, sont inscrits, test que l'on pourra consulter à loisir une fois l'expérience terminée, que l'on pourra annoter et qui permettra des comparaisons immédiates dans des conditions d'expériences identiques ou légèrement différentes.

En cas de doute ou de contestation, l'examen visuel laisse la porte ouverte à toutes les suppositions, à toutes les discussions, alors qu'un enregistrement du phénomène est un témoin impartial fournissant des renseignements précis contrôlables par tous.

L'enregistrement présente d'ailleurs bien d'autres avantages. Il donne dans certains cas la possibilité d'effectuer une analyse harmonique du phénomène étudié.

Si le trait est suffisamment fin, il permet du fait de sa continuité de construire la dérivée de la courbe, ce qu'on ne saurait faire à coup sûr à l'aide d'une courbe tracée par points; et d'en déduire des anomalies intéressantes.

L'enregistrement d'un phénomène peut s'effectuer en fonction de paramètres divers, le temps ou une grandeur physique choisie d'avance.

Enfin, avantage considérable, il est très facile d'enregistrer simultanément divers phénomènes sur une même bande, ce qui permet de rechercher immédiatement les rapports qui peuvent les

lier entre eux et d'établir des auto ou intercorrélations dans le temps ou dans l'espace de phénomènes complexes pseudopériodiques ou aléatoires. On enregistre couramment 6 courbes simultanément et certains enregistreurs spéciaux, destinés à l'aviation notamment, permettent l'enregistrement sous forme de courbes spéciales de 12 à 20 paramètres simultanés. La synchronisation de plusieurs enregistreurs assure la multiplication du nombre des enregistrements possibles.

Quant à l'interprétation des résultats, ceci est une autre histoire indépendante de l'enregistrement proprement dit : ce dernier étant supposé correct, c'est-à-dire n'apportant pas de contribution personnelle au phénomène qu'il était chargé d'inscrire.

DES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS D'ENREGISTREMENT

Les enregistreurs peuvent pratiquement être classés en trois catégories différentes : les enregistreurs mécaniques ou graphiques, les enregistreurs photographiques et les enregistreurs magnétiques.

L'enregistreur mécanique comportant une plume ou un stylet, traçant directement la courbe du phénomène sur un papier approprié, conduit à une simplification importante de l'appareillage par rapport à l'enregistreur photographique. Son tracé peut être d'ailleurs très fin et ce procédé présente le grand avantage de fournir une courbe instantanément visible.

Mais l'inertie de l'équipage mobile ne permet pas, en général, d'enregistrer des phénomènes très rapides et c'est, en définitive, la fréquence propre d'oscillation de l'équipage mobile qui détermine sa limite d'emploi.

Il est en effet difficile de donner à un équipage inscripteur à plume ou à style une fréquence propre supérieure à 70 par seconde (à moins de réduire considérablement son bras de levier, donc sa sensibilité) et, d'autre part, son degré d'amortissement est délicat à déterminer en raison du frottement mécanique du style sur le papier.

Il en résulte qu'il ne faut pas compter pouvoir enregistrer correctement avec un tel dispositif un phénomène, supposé périodique, dont la fréquence serait supérieure à 25 par seconde environ.

On voit tout de suite que l'emploi de l'inscripteur mécanique doit être réservé à l'enregistrement des phénomènes relativement lents.

Il faut, de plus, noter que l'énergie nécessaire au fonctionnement d'un inscripteur à plume dont la fréquence propre d'oscillation atteindrait 70 périodes par seconde serait beaucoup plus importante que celle qu'il faudrait mettre en jeu pour faire dévier le miroir d'un inscripteur photographique (dans le rapport de 1 à 20 comme ordre de grandeur). On a cependant réussi à construire des enregistreurs graphiques dans lesquels la plume est constituée

par un jet extrêmement fin d'une encre spéciale et la faible inertie de cette plume particulière a permis d'atteindre des fréquences d'inscription supérieures à 500 par seconde.

Quel que soit le type d'enregistreur utilisé, il est indispensable de repérer la courbe d'enregistrement obtenue par rapport à un paramètre auxiliaire. Ce dernier est souvent le temps, mais il peut être un espace parcouru, une déviation angulaire, une température, etc..., d'où la nécessité d'utiliser des signaux inscripteurs à style ou à miroir provoquant des tops sur le papier d'enregistrement.

Dans le cas d'enregistrements lents, l'inscription de ces repères ne soulève aucune difficulté et l'emploi de signaux électromagnétiques, polarisés ou non, convient dans la très grande majorité des cas.

L'enregistreur photographique est utilisé dès que l'on veut inscrire des phénomènes dont les pseudo périodes sont inférieures à 1/25 de seconde environ. Les oscillographes à aimant, à cadre, à boucle ou à fil permettent l'enregistrement de phénomènes dont la fréquence peut atteindre environ 10.000 par seconde. Pour des fréquences plus élevées, ou des temps d'enregistrement plus courts, l'emploi de l'oscillographe cathodique s'impose en donnant la possibilité d'enregistrer sur une courbe des accidents dont la durée est de l'ordre de 10^{-6} seconde et moins.

Enfin, l'enregistreur magnétique, s'il ne permet pas de voir directement la courbe du phénomène, présente dans certains cas le très grand avantage d'une analyse harmonique commode car on reste maître de règler la vitesse de déroulement du fil ou de la bande de manière à obtenir, lors de l'examen du phénomène, des fréquences facilement analysables à l'aide d'appareils maintenant classiques.

Si les phénomènes enregistrés sont très rapides, l'inscription des signaux auxiliaires conduit souvent à un appareillage un peu plus compliqué si l'on veut conserver toute la netteté désirable. Quelques dispositifs spéciaux seront décrits ultérieurement.

Un procédé d'enregistrement extrêmement intéressant se rapporte à l'obtention d'une courbe représentant la composition directe de la variation d'un phénomène en fonction d'un autre, le papier d'inscription restant fixe. Ce sera le cas, par exemple, de la courbe de dilatation ou d'aimantation en fonction de la température; d'une pression à l'intérieur d'un cylindre en fonction de la course du piston, etc... L'oscillographe cathodique résout très facilement ce problème, mais nous verrons que des dispositifs mécaniques ou optiques peuvent également être employés.

Quel que soit le type de l'enregistreur employé, il ne faut pas oublier qu'il est nécessaire de ne pas descendre en dessous d'un certain rapport entre la fréquence propre d'oscillations de l'appareil inscripteur et la rapidité (pseudo-fréquence ou fréquence) du phénomène à enregistrer.

Celui-ci doit autant que possible être supérieur à 10; un oscillographe de fréquence propre de 2.000 périodes par seconde convenablement amorti ne devra pas être employé pour enre-

gistrer des phénomènes de fréquence supérieure à 200 périodes par seconde, sauf toutefois dans le cas où l'on se trouve en présence d'un phénomène périodique de fréquence constante. Mais, si la courbe n'est pas une sinusoïde pure et peut se décomposer en serie de Fourier, il faut conserver au moins le rapport 10 indiqué sous peine d'obtenir une courbe déformée du fait du déphasage variable caractéristique de chaque rapport entre la fréquence du phénomène et celle de l'inscripteur.

Toutefois, si l'on ne cherche pas une très grande précision, on peut industriellement ramener ce rapport de 10 à 3 au minimum.

Dans le cas de l'inscription d'un phénomène à fréquence constante, on peut descendre au rapport 2 et même 1,5, en utilisant un inscripteur amorti aux 6/10 de l'amortissement critique.

On donne généralement au dispositif inscripteur un degré d'amortissement, soit légèrement inférieur à l'amortissement critique pour l'enregistrement des phénomènes transitoires, soit beaucoup plus faible, de l'ordre des 6/10 du coefficient d'amortissement critique pour l'enregistrement des phénomènes périodiques.

ENREGISTREMENT DES PHÉNOMÈNES RELATIVEMENT LENTS

Les phénomènes lents peuvent être enregistrés directement au moyen d'un style ou d'une plume à encre bien que l'on puisse employer un procédé photographique ou même avoir recours à l'oscillographe cathodique.

Toutefois, nous sommes ici dans le domaine de l'enregistreur mécanique et l'un des plus anciens dispositifs utilisés consiste à tracer la courbe sur un tambour métallique ou sur du papier couché préalablement recouvert de noir de fumée.

L'ENREGISTREUR A NOIR DE FUMEE est trop connu pour qu'il soit utile d'insister. L'emploi d'une plume légère en roseau, en plume d'oiseau ou en alliage léger permet d'obtenir des tracés extrêmement fins, et ce dispositif est encore couramment employé en physiologie par exemple ou en météorologie : citons le météorographe à 3 inscriptions : altitude, degré hygrométrique, température dans lequel les courbes sont inscrites sur une feuille d'aluminium recouverte de noir de fumée, enroulée sur un tambour entraîné par un mouvement d'horlogerie.

La fixation du tracé obtenu au moyen de styles terminés par une pointe fine est assurée par un vernis à la gomme laque.

Nous ne décrirons pas les nombreux modèles de cylindres métalliques recouverts de noir de fumée, entraînés à différentes vitesses, soit par un mouvement d'horlogerie ou un petit moteur électrique. Nous nous contenterons de signaler qu'un des derniers modèles d'enregistreurs à noir de fumée fut celui d'Abraham qui utilisait une bande de papier de 30 mm de largeur environ et des oscillographes à plume dont la fréquence propre atteignait 1000 par seconde. La faible amplitude des tracés ne permettait prati-

quement l'utilisation de cet enregistreur sur papier qu'en qualité d'inscripteur de temps.

Plus récemment est apparu sur le marché un enregistreur à style à 8 équipages mis au point par une importante société française (C.D.C.) dont les tracés s'effectuent sur un film de 35 mm de largeur recouvert d'un vernis noir spécial. La finesse du tracé est telle que le grandissement prévu par projection, normalement de 10, peut être porté à plus de 25. Les courbes apparaissent de plus sur un écran avec un grandissement de 5, en même temps que s'effectue l'enregistrement.

Les oscillographes à style ont une fréquence propre de 800 périodes par seconde et la courbe de réponse est pratiquement rendue rectiligne jusqu'à la fréquence 600 à l'aide d'un shunt résonnant.

Cet enregistreur, prévu pour usage industriel, nécessite évidemment pour actionner ses oscillographes une énergie bien plus importante que celle qu'il est nécessaire de dissiper dans un oscillographe à miroir d'où la nécessité d'employer conjointement, et très souvent, un amplificateur convenablement étudié.

L'INSCRIPTEUR A ENCRE est aussi couramment employé pour l'inscription des phénomènes lents et les appareils tels que voltmètres, ampéremètres, wattmètres, manographes, thermographes, etc..., sont d'un usage courant.

Ces instruments ont toujours une fréquence propre d'oscillations très basse, l'inertie de l'aiguille étant notablement accrue du fait de la présence du petit réservoir d'encre qu'elle comporte presque toujours.

Pour enregistrer des phénomènes dont la fréquence peut être de l'ordre de quelques dizaines par seconde, il est indispensable de supprimer ce réservoir et d'employer des inscripteurs constitués par un tube métallique ou un tube de verre de très faible diamètre (genre siphon recorder) dont l'extrémité placée près de l'axe de rotation plonge dans le réservoir d'encre.

Les enregistreurs à encre, en raison des améliorations récemment apportées aux oscillographes, sont de nouveau fréquemment utilisés, leur commodité d'emploi les faisant préférer pour les enregistrements peu rapides aux enregistreurs photographiques.

A titre d'exemple, mentionnons entre autres deux types d'enregistreurs à encre dont les caractéristiques sont plus particulièrement intéressantes :

Un modèle suisse (J.A.DREYFUS-GRAF) à 3 oscillographes de fréquence propre pouvant atteindre 800 périodes par seconde, de plusieurs centimètres d'amplitude rectiligne, et :

Un modèle suédois (système ELMQVIST) qui comporte, comme il a été indiqué précédemment, un oscillographe à jet ultra-fin d'un liquide spécial, ce qui permet d'obtenir des fréquences propres élevées de 600 à 700 périodes par seconde tout en conservant l'avantage d'une consommation d'énergie électrique réduite comparable à celle demandée par un oscillographe à miroir. L'inscrip-

tion s'effectue sur un papier dont la surface est traitée chimiquement, ce qui fait que cet enregistreur pourrait tout aussi bien rentrer dans le cadre des inscripteurs chimiques, toutefois sans frottement direct sur le papier sensible.

Signalons que dans certains enregistreurs à faible vitesse de déroulement, on peut utiliser un CONTACT INTERMITTENT, la plume à encre ne touchant le papier qu'à des intervalles de temps fixés d'avance, toutes les dix secondes par exemple. On évite ainsi l'empâtement du tracé, mais, la courbe obtenue étant discontinue, on perd une partie des avantages indiqués précédemment.

Dans d'autres modèles d'enregistreurs lents à pointés, chaque inscription est obtenue par appui de la plume sur le papier avec interposition d'un ruban encreur. Plusieurs rubans, de couleurs différentes, peuvent être utilisés, d'où la possibilité à l'aide d'un contacteur rotatif d'inscrire successivement plusieurs paramètres.

On peut également mentionner, parmi les enregistreurs par points, un dispositif qui consiste dans l'emploi d'un tambour en rotation permanente auquel est lié, en bout d'arbre, un potentiomètre rotatif. Sur ce tambour est fixée une hélice métallique en relief venant passer devant une barre fixe située suivant une génératrice du tambour. Le papier d'enregistrement passe entre la barre et le tambour et se trouve perforé par une étincelle lorsque, grâce à un dispositif électronique, la tension à mesurer est égale à celle du potentiomètre.

ENREGISTREUR A CRAYON ET A STYLE SUR PAPIER PARAFFINÉ

Lorsqu'on dispose d'une énergie suffisante permettant de négliger complètement les forces de frottement et que l'inertie de l'inscripteur ne gêne pas, on peut employer un simple crayon sur papier couché.

L'indicateur Maiak utilisé pour l'enregistrement des pressions dans les cylindres de machines à vapeur est un exemple classique de ce type d'appareil.

Dans l'enregistreur du spectrophotomètre Vassy, c'est un crayon à bille qui est utilisé.

Depuis plusieurs années, on utilise couramment l'inscripteur à papier paraffiné dans lequel le style, constitué par une pointe fine, vient gratter une mince couche de paraffine blanche déposée sur un papier à fond rouge ou noir.

Le tracé obtenu est très fin et ne nécessite aucun fixage particulier.

Cet inscripteur présente de nombreuses applications, soit sous forme de bande, soit sous forme de disque (vibrographe).

D'autre part, certains enregistreurs possèdent des oscillographes dont la plume porte à une extrémité un fil fin maintenu par un archet très léger. Ce fil, parcouru par un courant électrique, est porté à une température suffisante pour faire fondre à

petite distance la couche de paraffine du papier inscripteur. Dans le but d'obtenir un tracé fin et rectiligne, le papier paraffiné passe devant le fil chaud sur une arête assez vive.

ENREGISTREMENT GRAPHIQUE SUR FILM.

Certains appareils tels que sismographes ou vibrographes de construction anglaise et des inscripteurs de son de construction française, tracent la courbe du phénomène sur un film de celluloïd à l'aide d'une aiguille spéciale (pointe fine très légèrement arrondie déprimant la couche de celluloïd). Le tracé peut être d'une très grande finesse, puisque l'on inscrit facilement le 1/100 de millimètre et l'enregistrement, même pour des phénomènes de fréquence un peu élevée, peut être obtenu sur un film étroit se déroulant à vitesse relativement faible (4 à 20 mm par seconde).

Rentre dans la même catégorie d'enregistrement la gravure d'un film recouvert d'une couche de gélatine, au moyen d'un burin en diamant très obtus qui pénètre plus ou moins profondément dans la couche superficielle. Ce dispositif donne un tracé d'une très grande finesse et de faible largeur (au maximum 3 mm) mais nécessite une assez grande énergie.

Le dépouillement de la bande se fait par lecture au microscope ou agrandissement optique et des enregistrements de longue durée peuvent ainsi être réalisés sous forme de microfilms d'encombrement très réduit.

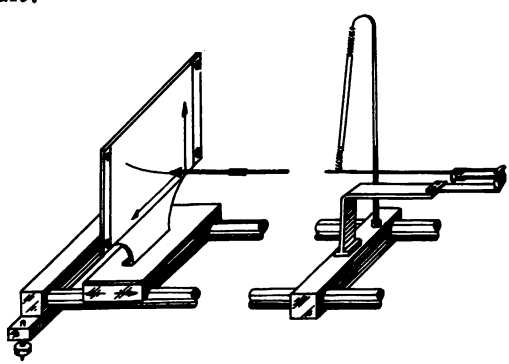


Fig. 1. - Inscripteur en coordonnées rectangulaires à contacts par points (bilame Chevenard).

L'inscripteur à plume peut également être employé pour l'enregistrement d'une courbe tracée en coordonnées rectangulaires sur une plaque fixe (déformation d'un bilame en fonction de la température, par exemple). Chevenard emploie couramment ce procédé dans ses appareils et pour éviter que le frottement constant en bout du stylet ne vienne perturber l'inscription, celle-ci s'effectue par points. Dans ce but, la plaque possède un faible déplacement rythmé n'assurant le contact avec l'extrémité du style qu'à des intervalles de temps fixés d'avance et suffisamment courts pour que la courbe tracée paraisse presque continue (fig. 1).

INSCRIPTEUR CHIMIQUE

Ce procédé d'enregistrement, couramment employé il y a plusieurs dizaines d'années, peut encore présenter un certain intérêt. La pointe métallique traceuse, servant d'électrode, peut ne frotter que très légèrement sur le papier imbibé d'électrolyte qui se déplace sur une plaque ou un rouleau métallique servant de deuxième électrode.

Plusieurs procédés peuvent être employés :

- Papier imprégné de sulfate neutre de soude avec quelques gouttes de phtaléine du phénol et un peu de glycérine - la pointe étant négative inscrit un tracé rouge.

- Papier imprégné d'une solution d'iodure de potassium, de nitrate d'ammonium et de glycérine. La pointe en métal inaltérable : acier inoxydable, or, platine, donne un tracé brun lorsqu'elle est positive.

Le procédé le plus pratique consiste à employer un papier imprégné d'une solution de : ferro-cyanure de potassium 5 g, nitrate d'ammonium 100 g, glycérine 10 g, eau 100 g, (solution qui se conserve mal). La pointe en fer laisse une trace de bleu de Prusse quand elle est positive. La pointe de cuivre laisse une trace brune (intensité du courant 1 milliampère). Lavée à grande eau et séchée, l'épreuve peut se conserver (pour plus de détails, voir notamment : "Le laboratoire de physique d'enseignement" par L.QUEVRON).

Citons également l'emploi du papier recouvert d'une couche blanche de sulfate de baryum sur lequel une pointe en laiton laisse une trace noire de sulfure de cuivre (C.I.M.E.L.).

Enfin, une trace noire peut également être laissée sur un papier blanc au thiosulfate de plomb par un saphir chauffé électriquement, fixé à l'extrémité d'une aiguille d'un oscillographe (Giannini); ce tracé est aussi très fin.

On a pensé également à utiliser le papier Télédeltos, papier métallisé à la poudre d'aluminium enduit d'une couche de carbon-black, amidon, blanc de titane et thiosulfate de plomb, qui noircit au passage du courant sous une tension de quelques dizaines de volts.

ENREGISTREUR PHOTOGRAPHIQUE

Si le déplacement du spot est très lent, il est possible d'effectuer un enregistrement direct sur papier ozalid en utilisant comme source de lumière une lampe à vapeur de mercure à grand éclat. On doit employer un dispositif optique pouvant fournir de la source ponctuelle une image aussi fine et aussi intense que possible.

La méthode est avantageuse puisqu'elle permet de suivre visuellement la courbe sur le papier ozalid formant écran dépoli et de conserver ensuite le tracé de cette courbe de fixation ordinaire à sec dans le gaz ammoniac.

Ce procédé n'est applicable que pour des vitesses relativement lentes d'enregistrement : soit jusqu'à 2 à 3 mm/sec. Pour des vitesses supérieures, il est nécessaire d'avoir recours à l'enregistrement sur papier photographique au bromure d'argent de sensibilité plus ou moins grande, suivant la rapidité de l'enregistrement et l'éclat du spot lumineux.

Restant pour le moment dans le cadre des enregistrements lents destinés à fixer la courbe fournie par exemple par un galvanomètre ou un électromètre, on peut concevoir cet enregistrement exécuté sur une plaque photographique ou un papier fixé dans un cadre, ou encore sur un papier ou un film fixé sur un tambour ou se déroulant sous forme d'une bande de longueur plus ou moins grande.

Entraînement du papier photographique.

Quel que soit le procédé d'entraînement choisi pour le film ou le papier, on cherche à obtenir une courbe aussi fine que possible.

Généralement, le spot est défini par l'intersection à angle droit de l'image de la source lumineuse obtenue sous la forme d'une ligne rectiligne de 2 à 3/10 de millimètre d'épaisseur et de quelques millimètres de longueur et d'une fente fine de 2 à 3/10 de millimètre derrière laquelle se déroule le film ou le papier.

Le déplacement uniforme du papier peut être obtenu de bien des manières :

Pour une plaque ou un cadre support d'un film ou d'un papier dont le déplacement doit être lent, on peut simplement utiliser un chariot monté sur trois galets (2 biconiques et 1 cylindrique se déplaçant sur deux rails ou deux barres cylindriques bien parallèles). Son déplacement peut être obtenu en utilisant la gravité, soit directement en inclinant légèrement le support général, soit à l'aide d'un pied tracteur, l'uniformité du mouvement étant réglée par exemple, au moyen d'un frein à air ou à huile de silicone de préférence pour éviter les variations du coefficient d'amortissement en fonction de la température.

La rotation d'un tambour ou d'un cylindre entraîneur de film ou de papier peut être obtenue, soit par un mouvement d'horlogerie, moteur à ressort muni d'un dispositif de régulation de vitesse et de réducteurs convenables, soit au moyen de petits moteurs électriques.

L'emploi de ceux-ci peut se concevoir, soit sous forme de moteurs à courant continu ou de moteurs universels munis d'un régulateur de vitesse par frottement ou par régulateur électrique (se méfier des dispositifs de réglage par coupures ou variations brutales de l'excitation genre Tyrill, si on utilise simultanément un amplificateur), soit par un moteur synchrone muni d'un réducteur de vitesse convenable. Ce dernier système est très séduisant, mais ne convient évidemment que si la fréquence du secteur est bien constante, ce n'est pas toujours le cas et il est prudent de s'en assurer avant d'adopter cette solution.

Une grande variation de vitesse de déroulement du papier peut être obtenue en utilisant un moteur à courant continu (ou alternatif redressé) dont l'inducteur est alimenté à tension constante et l'induit par impulsions à l'aide d'un montage thyratron.

Sources de lumière.

Pour les enregistrements lents, l'éclat de la source ne présente qu'un intérêt secondaire et pour l'enregistrement sur papier, film ou plaque photographique, n'importe quelle source peut convenir à condition que l'image fournie soit fine. La finesse compte plus que l'éclat à l'inverse de ce qui se présentera pour les enregistrements rapides. D'autre part, les miroirs des appareils de mesures lents sont souvent de grande surface, de l'ordre d'un centimètre carré, et les images fournies sont généralement bonnes. Donc aucune difficulté. L'emploi d'une fente étroite placée devant la source permettra d'obtenir une image fine et nous avons vu que seul l'emploi d'un papier peu sensible nécessite l'utilisation d'une source spéciale, telle que la lampe à vapeur de mercure.

VISUALISATION DE LA COURBE

Une mention particulière peut être faite concernant la visibilité d'une courbe d'un phénomène périodique ni trop lent, ni trop rapide telle que la courbe d'un électrocardiogramme ou d'un piézogramme et d'une manière générale de nombreux phénomènes physiologiques. La périodicité du phénomène étant de l'ordre de la seconde, on ne peut avoir une image d'ensemble de la forme de la courbe par examen visuel sur un écran dépoli ordinaire (dans ce cas, le spot doit naturellement être ponctiforme, la fente placée devant la source étant remplacée par un trou de faible diamètre).

Dans beaucoup de cas, il y a cependant intérêt à voir cette courbe dans son ensemble sans être obligé d'en effectuer l'enregistrement. On peut arriver à ce résultat, en utilisant un écran fluorescent au sulfure de zinc très persistant, excité par un spot fin et de grand éclat provenant d'une lampe à vapeur de mercure en quartz fournissant un rayonnement ultra-violet intense. L'écran sera utilement enroulé sur un tambour de grand diamètre tournant lentement.

On peut également, dans le même but, employer un oscillographe cathodique utilisant un écran fluorescent persistant spécial et muni d'un balayage lent.

Toujours en restant dans le domaine de l'enregistrement des phénomènes lents et plus particulièrement de ceux d'ordre physiologique, on peut signaler qu'un grand nombre d'entre eux peuvent se traduire, non plus par une variation de tension ou de courant électrique, mais par une variation de volume ou de pression.

On peut, dans tous ces cas, utiliser comme inscripteur, soit une capsule de MAREY, petite boîte étanche fermée par une membrane de caoutchouc, soit une capsule fermée par une membrane anéroïde. Le faible déplacement du centre de la membrane est

amplifié au moyen d'un levier très léger traçant la courbe de variation de pression sur un tambour recouvert de noir de fumée (enregistreur d'Arsonval) (fig.2).

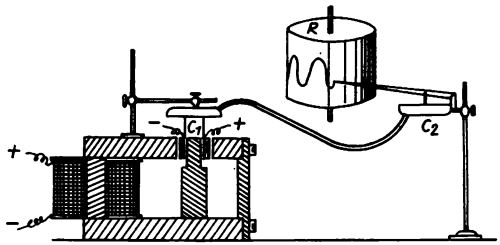


Fig. 2. - Enregistreur de d'Arsonval (1882) (capsule de Marey et inscripteur).

On peut également employer une capsule cylindre constituée par un tube thermostatique plissé très souple (tube tombac).

Nous verrons que ces manographes métalliques munis d'un miroir, en remplacement du levier, sont utilisés comme inscripteur de variations rapides de pression.

ENREGISTREUR COURANT APRÈS SON ZÉRO

Ce type d'enregistreur est utilisé depuis quelques années et présente certains avantages qu'il est bon de connaitre.

Supposons que l'on veuille enregistrer la courbe d'un phénomène quelconque se traduisant finalement par une variation de tension électrique appliquée aux bornes d'un potentiomètre ou d'un condensateur variable. La variation de tension est supposée suffisamment faible pour qu'elle nécessite l'emploi d'un amplificateur. Ce dernier ne reproduira fidèlement la courbe du phénomène avec toute la proportionnalité désirable que dans une bande relativement étroite, notamment en raison de la non linéarité de la courbe représentant l'intensité du courant de sortie de l'amplificateur.

Pour obvier à cet inconvénient, on peut s'arranger pour que le courant amplifié ait pour effet de manoeuvrer un curseur de potentiomètre ou un condensateur variable de telle manière que le courant de sortie soit toujours ramené à une valeur fixée d'avance.

Dans ces conditions, le déplacement de ce curseur, auquel est lié un style inscripteur, aura bien une amplitude proportionnelle à la variation initiale quelle que soit la courbe de réponse de l'amplificateur.

Pratiquement d'ailleurs, le courant moyen résultant du phénomène à étudier est mis en opposition (amplitude et phase) avec celui fourni par un système électrique auxiliaire alimenté par le même générateur que le montage détecteur lui-même.

Le courant résultant prend une valeur variable autour du zéro par suite de la variation du phénomène et c'est ce courant qui, une fois amplifié, commande le déplacement du curseur du potentiomètre relié au style inscripteur et ramenant le système au zéro.

Ce dispositif de commande peut être réalisé par un électro-aimant à longue course ou à l'aide d'une tige ferro-magnétique entraînée dans un sens ou dans l'autre par attraction magnétique contre des galets tournant en permanence, les électro-aimants d'attraction étant parcourus par le courant du déséquilibre (fig.3).

Il est ainsi possible d'obtenir des enregistrements graphiques de grande amplitude de phénomènes de fréquence pouvant atteindre 10 à 15 par seconde.

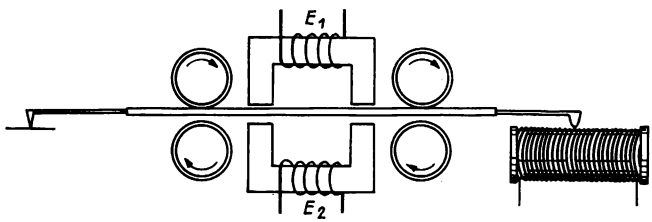


Fig. 3. - Enregistreur courant après son zéro.

ENREGISTREURS ASSERVIS

Au lieu d'inscrire directement les phénomènes ou plus exactement la tension qui finalement en résulte, ce qui nécessite toujours une énergie non négligeable pour actionner les galvanomètres à inscription directe, on peut asservir l'enregistreur aux indications du détecteur; on passe alors par l'intermédiaire d'un générateur extérieur, en général un petit moteur, qui fournit la puissance nécessaire à l'inscripteur.

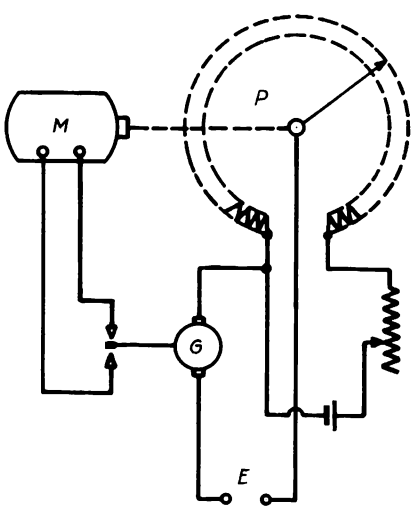


Fig. 4. - Enregistreur asservi.

Cet asservissement peut être, soit d'ordre mécanique, soit d'ordre électrique. En général, on oppose à la tension à mesurer une tension fournie par un potentiomètre auxiliaire de manière à annuler leur somme. Un galvanomètre branché dans le circuit commun aux deux tensions en série commande, à l'aide de 2 contacts mis en marche dans un sens ou dans l'autre, un petit moteur qui entraîne le curseur du potentiomètre (Micromax M.E. C.I.); le système s'arrête lorsque les tensions sont égales et l'inscripteur est lié au curseur du potentiomètre (fig.4).

Pour obtenir une plus grande rapidité de réponse, on peut substituer au galvanomètre mentionné ci-dessus un vibreur et un

amplificateur actionnant directement le moteur de commande du potentiomètre (Speedomax M.E.C.I.). Bien d'autres dispositifs d'asservissement peuvent d'ailleurs être conçus : galvanomètres et cellules photoélectriques, par exemple.

ENREGISTREMENT DES PHÉNOMÈNES RAPIDES

Nous classons dans cette catégorie les enregistrements intéressant les phénomènes qui, supposés périodiques, auraient une fréquence comprise entre 100 et 5.000 périodes par seconde (durée d'une période comprise entre 1/100 et 1/5.000 de seconde).

Pratiquement, l'enregistrement est toujours photographique, que le phénomène soit enregistré directement en provoquant la déviation d'un faisceau lumineux ou qu'il soit transformé en une variation de tension ou d'intensité de courant attaquant après ou sans amplification un oscillographe de fréquence propre convenable.

Nous rappelons qu'il est nécessaire d'utiliser un appareil de mesure convenablement amorti dont la fréquence propre d'oscillations doit toujours être élevée par rapport à celle du phénomène à étudier. Dans le cas présent, nous aurons affaire, non pas à des électromètres ou des galvanomètres, mais à des oscillographes de fréquence propre élevée (comprise entre 500 et 10.000 périodes par exemple).

LES OSCILLOGRAPHES

Ces oscillographes peuvent se classer en plusieurs catégories dont les principales sont :

- Les oscillographes piézoélectriques;
- Les oscillographes électromagnétiques à palette, à cadre ou à boucle;
- Les oscillographes cathodiques.

Oscillographes piézoélectriques. - Peu employés, en raison de leur faible sensibilité, ils utilisent le phénomène piézoélectrique inverse consistant en la déformation d'un cristal taillé suivant une direction bien définie sous l'influence d'une tension électrique convenablement appliquée.

On utilise généralement un couple de deux lames piézoélectriques accolées formant un bilame (quartz, sel de Seignette ou titanate de Baryum). Sous l'influence de la tension appliquée, une lame tend à s'allonger et l'autre à se raccourcir; il en résulte une flexion de l'ensemble provoquant la déviation d'un petit miroir.

Les tensions nécessaires au fonctionnement d'un tel oscillographe sont de l'ordre de plusieurs dizaines de volts et leur échelle d'utilisation assez étroite, leur gamme de fréquence

varie entre 1 et 100 c/s, elles ne peuvent en effet être utilisées pour des tensions lentement variables.

Les oscillographes électromagnétiques. - sont bien connus et nous n'en citerons que quelques types plus particulièrement employés. L'oscillographe à palette Dubois dont la fréquence propre ne dépasse pas 2.000 par seconde est un appareil robuste muni d'un grand miroir de plusieurs millimètres carrés de surface, mais ne peut être considéré, du fait de sa conception même, comme un appareil de précision. Il peut toutefois être recommandé lorsqu'il s'agit de dégrossir un phénomène.

L'oscillographe à cadre ou à boucle, genre Blondel, et les modèles étrangers qui en dérivent (Siemens, R.C.A., Cambridge) sont d'excellents appareils sensibles et fidèles dont la fréquence propre peut atteindre 25.000 par seconde, mais présentent l'inconvénient d'être munis de miroirs de très faible surface (ordre de 1 mm^2) et nécessitent de ce fait l'emploi d'un système optique particulier.

L'apparition de nouveaux aimants et l'étude très poussée concernant les dimensions optima à donner aux oscillographes, soit à aimant mobile, soit à cadre ou bifilaire dans le but d'améliorer leurs performances, ont permis de mettre sur le marché depuis quelques années des instruments très légers, de faible encombrement et de caractéristiques extrêmement intéressantes : fréquence propre élevée, sensibilité accrue et consommation en énergie électrique fort réduite. La fréquence propre de certains types d'oscillographes peut dépasser 20.000.

Enfin, les Oscillographes cathodiques sont mentionnés spécialement dans un chapitre de cette publication.

L'enregistreur utilisant, par exemple, un des modèles d'oscillographes électromagnétiques, doit donc comporter les organes suivants : une source de lumière, l'oscillographe et un magasin ou un tambour tournant muni d'un film ou d'un papier photographique. Accessoirement, l'enregistreur comprendra des signaux divers de repérage et un compte-temps. Il peut également posséder un obturateur spécial, notamment dans le cas du tambour tournant, de manière à éviter la superposition de plusieurs enregistrements sur la même bande.

A titre indicatif, nous décrirons quelques types particuliers d'enregistreurs qui peuvent être munis, soit d'oscillographes à cadre ou à aimant, soit d'instruments de mesure à miroir tels que manographes, accélérographes, etc...

ENREGISTREUR AUTOMATIQUE

Prenons d'abord le cas complexe suivant qui peut se présenter dans de nombreuses recherches de laboratoire :

On veut enregistrer simultanément un certain nombre de courbes fournies par des oscillographes électromagnétiques (mettons 6), le déclenchement de l'oscillographe étant provoqué, avec le minimum de retard, par une variation brusque d'un des phénomènes à étudier.

L'enregistreur doit s'arrêter de lui-même lorsque la variation intéressante a pris fin et se remettre en ordre de marche dans l'attente de l'apparition d'une nouvelle variation (enregistreur automatique de perturbation).

La fréquence des phénomènes à enregistrer étant par exemple de l'ordre de 200 par seconde, on prendra des oscillographes munis de grands miroirs ayant une fréquence propre de l'ordre de 1.500 à 2.000 périodes par seconde.

On désire, d'autre part, effectuer l'enregistrement sur une bande de papier se déroulant à la vitesse de 40 centimètres par seconde, le retard à l'enregistrement ne devant pas excéder 1/60 de seconde.

Le problème technique classique peut être résolu de plusieurs manières. En voici une relativement simple :

Le moteur d'entraînement du cylindre provoquant le déroulement du papier photographique commande la rotation de ce cylindre par l'intermédiaire d'un embrayage à friction Em dont les deux disques sont, en période d'attente, distants d'environ 2/10 de millimètre. Le moteur (non représenté) tourne donc en permanence, mais sans entraîner le papier (fig. 5).

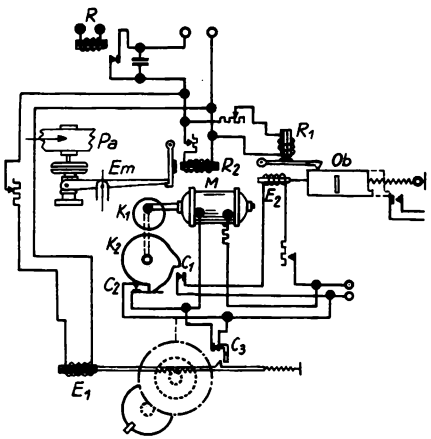


Fig. 5. - Enregistreur automatique de perturbations (schéma électrique).

D'autre part, le système optique d'éclairage des miroirs des oscillographes ne comporte qu'une seule lampe à filament rectiligne dont un système de lentilles forme une image fine sur une fente fixe F_1 qui sert de source secondaire d'éclairage. L'angle du cône lumineux issu de cette source est suffisamment ouvert pour que tous les miroirs des oscillographes soient éclairés simultanément. (fig. 6).

Ces miroirs concaves forment une image fine de la source lumineuse devant la fente F_2 derrière laquelle se déroule le papier, les images fournies par les miroirs des oscillographes étant perpendiculaires à cette fente longue et étroite, leur intersection définit le spot d'inscription.

En période d'attente, un volet mobile d'obturation Ob cache la fente lumineuse.

Dès que la variation intéressante se produit, un relais rapide R_1 provoque simultanément l'ouverture de l'obturateur et le collage des disques d'embrayage.

L'inscription s'effectue avec un retard inférieur à 1/50 de seconde. Simultanément, la perturbation a eu pour effet d'armer

un électroaimant à longue course F_1 qui pourra revenir dans sa position de départ en un temps variable, par exemple entre 2 et 10 secondes.

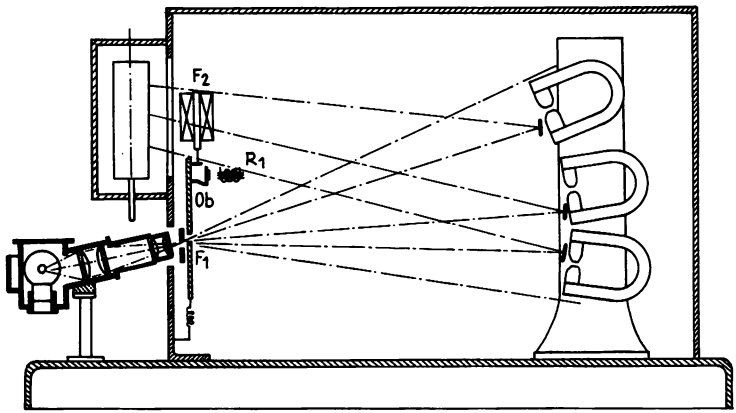


Fig. 6. - Enregistreur automatique de perturbations (schéma optique).

L'enregistrement se produit donc pendant toute la durée de la perturbation et, lorsque celle-ci cesse, le relais à longue course (ou relais à temps) revient à sa position de repos et produit un contact C_3 commandant la mise en marche d'un petit moteur Mt actionnant une série de cames. L'une de celle-ci K_1 provoque le débrayage du cylindre d'entraînement du papier, une autre K_2 commande un contact C_1 qui provoque le réarmement du volet d'obturation de la fente source de lumière, une troisième C_2 coupe enfin le contact de marche du petit moteur de commande du groupe des cames, de telle manière que celles-ci ne puissent effectuer qu'un seul tour complet. Tout l'enregistreur se trouve ainsi remis en position d'attente.

Il est évident que la commande générale peut être provoquée, non seulement par la perturbation elle-même (relais R), mais plus facilement au gré de l'opérateur.

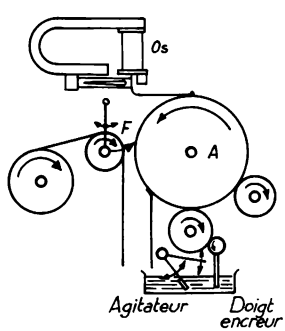


Fig. 7. - Oscillopertur-bographe Masson.

Signalons, à propos des enregistreurs automatiques, un dispositif très ingénieux, l'OSCILLOPERTURBATEUR MASSON, qui consiste à inscrire en permanence, sur un tambour, l'ensemble des phénomènes, mais à les effacer continuellement au bout de une à deux secondes s'il ne se produit rien d'intéressant.

Dans le cas contraire, apparition d'une perturbation par exemple, l'inscription est imprimée sur une bande de papier dont l'application contre le tambour est également commandée par la perturbation (fig. 7)

Pratiquement, un cylindre d'acier A est continuellement enduit d'une couche d'encre par un jeu de rouleaux et tourne à une

vitesse périphérique constante de l'ordre de 100 millimètres par seconde.

Les équipages mobiles des oscillographes O_3 portent un saphir qui trace un sillon sur la pellicule d'encre du cylindre, sillon effacé ensuite par un rouleau. En cas d'incident, un système de relais et d'électroaimants applique la feuille diagramme F contre le cylindre et prend l'empreinte du sillon; l'inscription restant visible commence ainsi environ une demi-seconde avant le début du phénomène intéressant, qui est, de ce fait, entièrement enregistré.

ENREGISTREUR MUNI D'UN OU DE PLUSIEURS OSCILLOGRAPHES DE FRÉQUENCE ÉLEVÉE A MIROIRS DE TRÈS PETITES DIMENSIONS (de l'ordre du millimètre carré de surface)

Le dispositif d'entraînement du papier ou du film dont la longueur peut être de plusieurs dizaines de mètres ne présente rien de particulier, toute la difficulté réside dans le système d'éclairage des miroirs qui peut être constitué de la manière suivante (fig. 8).

Les rayons lumineux issus de la source de lumière S sont concentrés au moyen d'une lentille L sur le miroir M supposé plan de l'oscillographe, le faisceau étant diaphragmé verticalement au moyen d'une fente assez étroite F_1 .

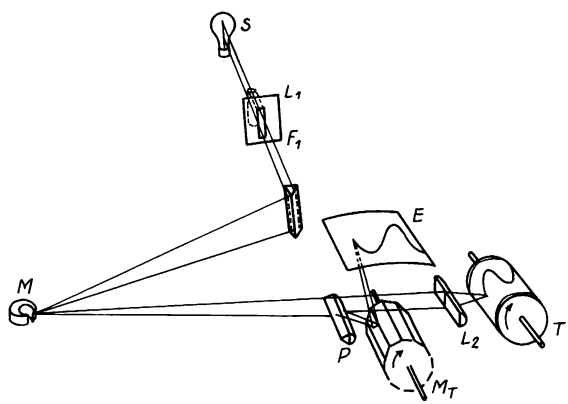


Fig. 8. - Enregistreur oscillographique à boucle, de fréquence élevée.

Les rayons réfléchis par le miroir, qui définissent une nappe lumineuse verticale, tombent sur une lentille cylindrique horizontale suffisamment large, celle-ci reforme un point lumineux qui servira à l'inscription photographique.

Il est, d'autre part, possible de faire dévier, avant ou après la lentille de concentration, une partie de la nappe lumineuse, au moyen d'un prisme P vers un écran dépoli E qui permettra l'examen visuel pendant l'enregistrement photographique (grâce au miroir tournant T).

Mentionnons que les constructeurs spécialisés fournissent maintenant toute une gamme d'enregistreurs susceptibles de répondre à peu près à tous les besoins des Laboratoires de recherches et d'essais.

Ceux-ci disposent donc, soit d'enregistreurs destinés à être employés à poste fixe et capables d'inscrire simultanément un très grand nombre de courbes avec des vitesses de déroulement extrêmement variables pouvant atteindre 2 m/sec pour des bandes de papier de 20 cm de largeur, soit d'enregistreurs portatifs que l'on pourrait presque qualifier d'enregistreurs miniatures utilisables dans des essais spéciaux. C'est ainsi que les nécessités d'obtenir des enregistrements d'un grand nombre de paramètres à bord d'avions, principalement lors des essais en vol, ou à bord d'engins spéciaux ont conduit à la réalisation d'enregistreurs de forme parallèlipipédique et plus récemment cylindrique dont les dimensions ont été progressivement en diminuant pour arriver, par exemple, aux enregistreurs cylindriques susceptibles d'inscrire 4 paramètres différents en plus du repérage de temps et dont les dimensions n'excèdent pas 70 mm. de diamètre et 120 mm. de longueur : ces enregistreurs peuvent de plus être soumis à des accélérations violentes et même à des chocs sans que leurs organes fondamentaux s'en trouvent détériorés.

Tracé des courbes.

Dans la grande majorité des cas, la courbe présentant la variation du paramètre en étude en fonction, soit du temps, soit de l'espace par exemple est obtenue sous forme directe par un tracé aussi fin mais aussi net que possible; comme indiqué précédemment, ce tracé résulte en général de l'intersection d'un trait fin, image d'une source lumineuse, et d'une fente de faible largeur.

Toutefois, dans certains cas et notamment en électrophysiologie, on emploie assez souvent une inscription à densité constante, la courbe étant représentée par la ligne de séparation entre une zone blanche non impressionnée et une zone noire impressionnée partant d'une ligne zéro. Dans ce but, la source lumineuse est constituée non plus par une fente fine (ou un trou de faible diamètre) mais par l'arête d'une lame opaque laissant passer en dessous d'elle une large plage éclairée.

Ce dispositif permet difficilement l'inscription simultanée de plusieurs courbes de grande amplitude susceptibles de se couper, mais présente l'avantage de rendre plus visibles des accidents à front très raide, tels que les impulsions des courants d'action en physiologie. Il permet d'autre part, une analyse harmonique commode de la courbe par exploration au moyen d'un balayage par faisceau lumineux, cellule photoélectrique, amplificateur et analyseur. (Ce procédé d'analyse est rendu extrêmement difficile lorsqu'on se trouve en présence d'un enregistrement classique par courbe fine ou continue).

On peut également signaler l'enregistreur Mirragraph qui inscrit 12 tracés sur un film de 35 mm, la largeur de modulation étant inférieure à 2 mm, les tracés se présentent sous la forme

de pistes sonores à densité constante et grâce à la très grande finesse du trait on peut enregistrer des fréquences de 3000 c/s ou des déroulements de l'ordre de 30 cm/s.

Enfin, l'enregistrement photographique à densité variable, avantageux pour le cinéma parlant,n'est pratiquement pas utilisé en Laboratoire en raison du développement photographique délicat auquel il conduit.

Enregistreurs magnétiques.

Si le principe de l'enregistreur magnétique n'est pas nouveau, puisqu'il remonte à Poulsen, au début du siècle, son utilisation comme procédé d'enregistrement des variations de tension, aboutissement final des informations fournies par des détecteurs de pression, d'effort, d'accélération, et autres grandeurs mécaniques, est relativement récente.

Pour réaliser ce type d'enregistreur, on s'est initialement adressé aux magnétophones, de modèles divers, enregistreurs et reproducteurs de sons qui doivent correctement fonctionner dans des bandes de fréquences bien déterminées. On s'est rapidement aperçu qu'il était nécessaire de modifier ces appareils, de les perfectionner de manière à les rendre non plus qualitatifs, mais quantitatifs et cela dans des domaines de fréquences très étendus. D'ailleurs, ces améliorations des qualités demandées aux enregistreurs magnétiques sont en cours de réalisation et nous ne donnerons que quelques caractéristiques techniques les concernant en indiquant les avantages que l'on peut en attendre.

Il existe deux types principaux d'enregistreurs magnétiques : à fil et à bande; un troisième type utilisant une substance pulvérulente sur support plastique est encore pratiquement au stade des essais industriels.

Quel que soit le modèle utilisé, l'enregistreur possède en principe trois têtes différentes : une d'effacement, une d'inscription et une de lecture et d'analyse. Pour effectuer un enregistrement, on fait défiler le fil magnétique ou le ruban recouvert de la substance magnétique aussi près que possible, mais à distance constante de l'entrefer d'un petit électro-aimant parcouru par le courant à inscrire. La substance magnétique doit posséder des caractéristiques bien définies concernant la perméabilité déterminant en principe la courbe de fréquence, et la coërcivité qui définit le niveau d'enregistrement maximum. Afin d'augmenter considérablement le rapport signal/bruit de fond, on superpose au courant à enregistrer un courant alternatif de fréquence élevée, généralement de l'ordre de 50.000 c/s, fréquence qui doit être nettement supérieure à la valeur la plus élevée de la fréquence à inscrire (rapport de 4 au minimum). On a d'ailleurs réalisé des enregistrements de courants de fréquence supérieure a 100 kc/s, ce qui soulève de grosses difficultés en raison des faibles constantes de temps qu'il est nécessaire de donner aux circuits électriques et des pertes magnétiques diverses qui apparaissent dans le circuit magnétique.

La tête d'effacement est également constituée par une bobine à faible entrefer parcourue par un courant alternatif dont la fré-

quence est environ le double de celle modulée par le courant à analyser.

Enfin, la tête de lecture ou d'analyse est généralement branchée sur un amplificateur qui doit couper le courant de haute fréquence de polarisation en laissant passer uniquement celui de modulation.

On voit que si, du point de vue purement acoustique-physiologique, les magnétophones donnent d'excellents résultats, bien des difficultés sont à surmonter pour faire de ces appareils des inscripteurs et des analyseurs parfaits. En plus de la nécessité d'obtenir des vitesses de défilement absolument constantes (à quelques millièmes près), il est nécessaire que l'induction magnétique rémanente acquise par le fil ou le ruban en chacun de ses points, soit rendue proportionnelle au courant à analyser et ceci dans des bandes de fréquences qui peuvent être très larges. Il faut également tenir compte du fait que la tension recueillie par la tête de lecture est proportionnelle à la dérivée du flux donc à l'induction magnétique. La courbe de réponse de l'amplificateur doit d'ailleurs pouvoir corriger celle de la tête d'analyse en fonction de la fréquence, à courant d'enregistrement constant.

Toutefois, ces difficultés de réalisation sont largement compensées par les avantages que présente l'emploi de ces enregistreurs, avantages que l'on peut résumer comme suit : enregistrement de longue durée, mettons de l'ordre d'une heure; inscription simultanée de plusieurs courbes, certains types d'enregistreurs à bandes étant multipistes, chaque piste ne couvrant qu'une largeur de l'ordre de un millimètre; vitesse de défilement pouvant être très variable, donc facilité de réglage de la vitesse de reproduction, quelle que soit celle d'inscription, de manière à faire tomber les fréquences du courant de modulation dans des bandes directement et facilement analysables à l'aide d'analyseurs harmoniques électroniques de modèle classique (changement de fréquence).

Des études de corrélation des phénomènes enregistrés dans des intervalles de temps et d'espace variés peuvent commodément être entreprises. Tous ces avantages font que les enregistreurs magnétiques, déjà utilisés en physiologie, en géophysique, en aérodynamique, verront certainement leur champ d'applications s'étendre considérablement dans de multiples domaines.

ENREGISTREMENT DES PHÉNOMÈNES MÉCANIQUES ASSEZ RAPIDEMENT VARIABLES

Laissant de côté l'enregistrement des valeurs statiques, nous envisagerons seulement celui des variations rapides d'efforts, d'accélérations ou de déplacements, etc..., qui peut s'obtenir simultanément en nombre variable sur un film ou sur un papier photographique.

Pour arriver à ce résultat, on a recours à des détecteurs transformant les déplacements, accélérations, efforts en gran-

deurs électriques que l'on peut inscrire à distance, en s'adressant à des phénomènes stables et bien connus, tels que :

- La piézoélectricité.
- La magnétostriction.
- Les variations de champ magnétique.
- Les variations de capacité.
- Les variations de résistance.
- Les variations de self induction.
- La cellule photoélectrique.

Utilisation des propriétés piézoélectriques des cristaux.

Nous supposons connu le phénomène de la piézoélectricité qui se manifeste pour différents cristaux ne présentant pas de centre de symétrie et dont les plus connus sont le quartz, la tourmaline, le sel de Seignette, le phosphate monopotassique et le titanate de baryum.

Le quartz couramment utilisé, soit sous forme de disques dont les faces sont taillées perpendiculairement à l'axe électrique, soit sous forme de lames taillées à la fois perpendiculairement à l'axe optique et à un axe électrique, possède un module piézoélectrique relativement faible ($6,4 10^{-8}$ UES), mais présente par contre des propriétés mécaniques intéressantes. On peut, par exemple, le faire travailler à la compression à plus de 10 kg par millimètre carré.

De plus, son coefficient de température est très faible jusque vers + 70° C.

Un montage à quartz pour mesures de variations rapides de pression ou d'accélération comprend en général :

Un détecteur, une lampe électromètre, un amplificateur, si possible à courant continu, et l'enregistreur photographique muni d'un oscillographe électromagnétique ou cathodique.

La figure 9 représente un accélérographe piézoélectrique.

La figure 10 représente un manographe pour fortes pressions.

La figure 11 représente un manographe pour moteur.

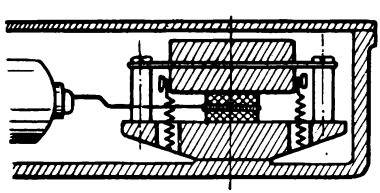


Fig. 9. - Accélérographe à quartz piézoélectrique.

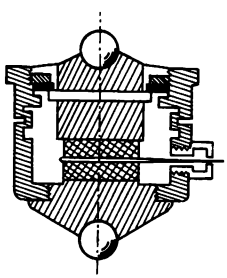


Fig. 10. - Manographe à quartz piezo-électrique pour fortes charges.

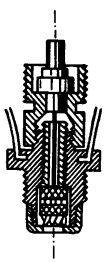


Fig. 11. - Manographe à quartz piézoélectrique pour moteur.

L'inconvénient majeur du quartz résulte de la faible valeur du module piézoélectrique, ce qui nécessite l'emploi simultané d'un amplificateur assez puissant. Il y a lieu, d'autre part, de rendre étanche le carter contenant le détecteur à quartz ainsi que celui abritant la lampe électromètre et leur connexion de liaison, afin d'éviter toute trace d'humidité. Au point de vue mécanique, de grandes précautions sont à prendre pour éviter que les phénomènes d'accélérations ne viennent pas, dans les manographes, perturber la mesure des efforts.

L'utilisation du quartz reste cependant tout à fait recommandable chaque fois qu'il sera nécessaire de détecter et d'enregistrer des phénomènes rapides (accélérations et mesures isométriques de pression).

- Le sel de Seignette possède un avantage indiscutable sur le quartz, celui d'avoir un module piézoélectrique plusieurs centaines de fois plus grand; et comme, d'autre part, les fuites sont très faibles s'il est bien protégé de l'humidité et que la capacité propre du sel de Seignette est élevée, on obtient une bonne constante de temps et l'on peut réduire l'amplification au strict minimum. Mais ces avantages sont amoindris par le fait que le cristal ne peut être soumis à une élévation de température, même légère, sans voir ses propriétés piézoélectriques baisser rapidement et que sa fragilité ne permet de le soumettre qu'à des efforts très inférieurs à ceux que l'on applique sur le quartz. Il est néammoins employé comme détecteur de vibrations (accélérographe palpeur) suivant un montage sensiblement plus simple, mais présentant une fréquence propre d'oscillations beaucoup plus basse que celle du quartz.

Le titanate de baryum, auquel on incorpore différents autres constituants en quantité variable, titanate de plomb, titanate de strontium, est une céramique qui présente par contre des caractéristiques mécaniques et piézoélectriques très intéressantes : module d'Young 8.10^{11}, pouvoir inducteur spécifique environ 2000, coefficient piézoélectrique de l'ordre de $200\ 10^{-8}$ au lieu de $6,4\ 10^{-8}$ pour le quartz; cette céramique piézoélectrique, qui peut d'autre part être utilisée entre -60° et +90°, constitue actuellement un des meilleurs détecteurs de pression et des paramètres dérivés que l'on puisse utiliser.

Utilisation des phénomènes de magnétostriction.

La magnétrostriction consiste dans la propriété que possèdent certaines substances magnétiques (nickel, ferronickel, ferrocobalt) de changer de dimensions linéaires lorsqu'elles sont soumises à des variations de champ magnétique et inversement de changer d'état magnétique lorsqu'elles font l'objet d'une contrainte mécanique. Le phénomène global de magnétostriction résulte d'ailleurs de plusieurs effets différents.

Pratiquement, l'effort de traction ou de pression (ou bien le couple) est appliqué sur un noyau de nickel placé dans un circuit magnétique fermé par des tôles (fig. 12). Le bobinage comporte généralement deux enroulements, l'un servant d'excitation pour

obtenir la valeur moyenne de l'induction et l'autre à recueillir la tension alternative engendrée par les variations de perméabilité.

L'appareil est utilisable pour des efforts notables et assez rapidement variables. La proportionnalité est bonne à condition de ne pas faire travailler le métal à un coefficient mécanique trop élevé.

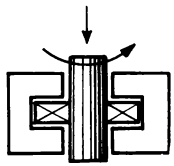


Fig. 12. - Schéma d'un manographe à magnétostriction.

Dans ce système, comme dans celui à variation de champ magnétique, la force électromotrice produite est proportionnelle, non pas directement à la force (ou à l'accélération) mais à sa dérivée par rapport au temps.

Il faut, donc. en général, utiliser un système intégrateur dans l'amplificateur, constitué par une liaison résistance-capacité de valeurs déterminées suivant la gamme de fréquences étudiées.

Utilisation des variations de champ magnétique.

Ce dispositif bien souvent utilisé, depuis Galitzine et d'Arsonval, est relativement simple : il consiste dans le déplacement d'une bobine dans le champ magnétique annulaire d'un aimant à noyau (montage des haut-parleurs électrodynamiques). Il a l'avantage de ne pas nécessiter une position initiale parfaitement déterminée de la partie mobile du détecteur par rapport à la partie fixe, mais présente l'inconvénient de fournir des indications qui sont proportionnelles à la vitesse de déplacement de la bobine par rapport au champ magnétique de l'aimant. Il faut donc, soit intégrer électriquement si l'on veut obtenir le déplacement, soit dériver électriquement si l'on veut obtenir l'accélération.

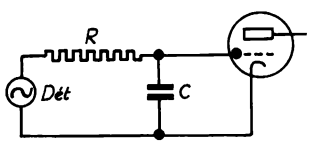


Fig. 13. - Schéma de principe d'un intégrateur électrique.

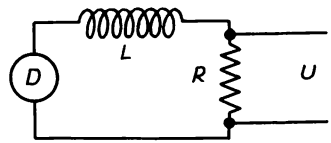


Fig. 14. - Autre schéma de principe d'un intégrateur électrique.

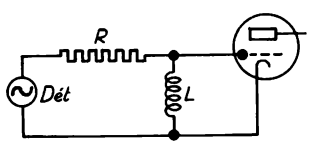


Fig. 15. - Schéma de principe d'un dérivateur électrique.

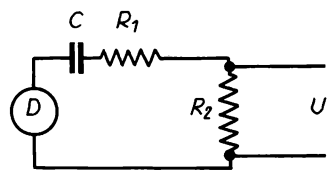


Fig. 16. - Autre schéma de principe d'un dérivateur électrique.

En principe, les schémas d'un intégrateur et d'un dérivateur électriques (représentés figures 13, 14, 15 et 16) sont très simples, mais pratiquement, en raison notamment de la self propre

du détecteur, il est indispensable d'utiliser plusieurs groupes de résistances et de capacités (ou de selfs) chacun d'eux ne donnant des indications à peu près exactes que dans une bande de fréquences assez étroite.

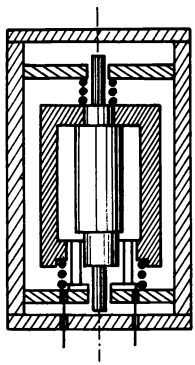


Fig. 17. - Vibrographe Sperry (variation de champ magnétique).

La figure 17 représente un détecteur de vibrations (seismographe, système Sperry).

La figure 18 représente un détecteur de vibrations en torsion, système Sperry).

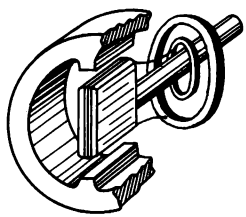


Fig. 18. - Torsiographe Sperry.

Utilisation des variations de capacité.

L'enregistrement des vibrations ou des efforts par variation de distance entre les armatures d'un condensateur peut se concevoir sous plusieurs formes : soit en utilisant un montage purement électrostatique, les variations de tension résultant des variations de capacité étant appliquées directement à un électromètre ou une lampe électromètre suivie d'un amplificateur et d'un oscillographe. Soit en utilisant les variations de tension aux bornes d'un condensateur à capacité variable, directement après amplification convenable ou indirectement pour moduler un courant de haute fréquence, un montage amplificateur-détecteur suivi d'un oscillographe complétant l'installation. Soit enfin en utilisant un montage de capacités en pont alimenté également en haute fréquence. Dans ces derniers montages, il est toujours nécessaire de prévoir des dispositifs de compensation des courants dérivés.

Dans la majorité des cas, l'effort à mesurer est appliqué sur une lame flexible (de raideur proportionnelle à l'effort) formant l'armature à la masse d'un condensateur, placée en regard de l'armature aussi parfaitement isolée que possible. La distance séparant ces deux armatures doit être très faible pour rendre importantes les variations obtenues sous l'effet des efforts exercés.

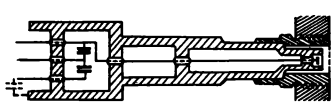


Fig. 19. - Manographe pour moteur, à capacité, système Philips.

Dans le manographe pour moteur, dont le schéma est donné figure 19, la distance séparant les deux armatures est de 2/10 de millimètre. La membrane formant armature mobile, à la masse,

est en acier spécial et présente une fréquence propre d'oscillations très élevée, l'armature centrale est isolée à la stéatite.

Ce condensateur est intercalé dans un montage en pont de capacités en haute fréquence, placé dans le voisinage de l'élément détecteur (fig.20). La fréquence d'alimentation du pont : 400 kc sert d'onde porteuse à laquelle viennent se superposer les modulations résultant de la variation de capacité du détecteur. Des dispositifs de correction sont prévus pour éliminer les effets des capacités parasites et des variations dues à la température de la membrane. Finalement, les variations de tension sont amplifiées dans un amplificateur laissant passer une bande de 30 kc. On utilise à la sortie un oscillographe cathodique.

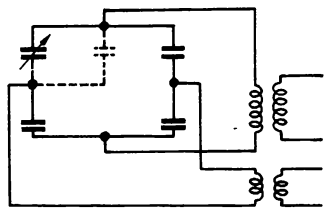


Fig. 20. - Schéma électrique du dispositif en pont H.v. du manographe Philips.

La capacité variable peut également être constituée par un système cylindrique comprenant deux armatures concentriques cannelées, l'une extérieure fixe, par exemple, présentant des cannelures inférieures en regard desquelles se trouvent les cannelures périphériques du cylindre mobile intérieur.

Utilisation des variations de résistance.

L'élément détecteur a d'abord été constitué par un empilage de disques de graphite et a ainsi donné lieu à des réalisations intéressantes d'accélérographes et de manographes. Mais l'emploi de ce dispositif, très simple en apparence, présente plusieurs inconvénients; il existe, notamment, un coefficient de température important au-dessus de 50° et, de plus, la valeur absolue de cette résistance ne reste pas constante dans le temps. D'où, la nécessité d'un tri sévère des pastilles et d'un vieillissement préalable par application d'efforts alternés. Ce dispositif est actuellement laissé de côté depuis l'apparition des jauges à fil résistant (strain-gages).

En effet sous une autre forme l'utilisation des variations de résistance, pour la mesure des efforts, et, notamment, comme extensomètres, s'est considérablement étendue ces dernières années à la suite de la mise au point de dispositifs utilisant, soit des bandelettes résistantes en agglomérés au carbone de faibles dimensions (quelques dizièmes de millimètre d'épaisseur, quelques millimètres de largeur et quelques centimètres de longueur), soit des résistances constituées par des fils métalliques, genre constantan, présentant un coefficient de température aussi faible que possible.

Les applications des jauges à fil résistant se multipliant rapidement, signalons leurs particularités de réalisation et d'emploi. Leur principe de fonctionnement est bien connu depuis un siècle : lorsqu'on soumet un fil à un effort de traction, il en résulte un allongement relatif $\Delta\ell/\ell$ et une diminution relative

de son rayon $\Delta r/r$ telle que $\frac{\Delta r}{r} = -\sigma \frac{\Delta \ell}{\ell}$, σ étant le coefficient de Poisson.

Si l'on suppose que la résistivité ρ ne varie pas, les variations de dimension du fil provoquent une variation de résistance $\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\sigma)\frac{\Delta \ell}{\ell}$ puisque $R = \rho \frac{\ell}{4 \pi r^2}$, σ étant de l'ordre de 0,3, on devrait obtenir :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta \ell}{\ell} \simeq 1,6 \frac{\Delta \ell}{\ell}$$

Or, on obtient très souvent un coefficient supérieur à 2 ou inférieur à 1 dans de rares cas, ce qui tend à montrer que la résistivité varie également ($\Delta\rho/\rho$ n'est pas nul).

On a le choix comme nature de fil entre beaucoup de métaux ou d'alliages, mais il faut tenir compte de nombreux facteurs autres que le coefficient k qui doit lui-même, autant que possible, rester constant. C'est ainsi que le coefficient de température, la limite d'allongement, les phénomènes d'hystérésis, les effets thermo-électriques des soudures jouent un rôle très important. Ces facteurs intéressent la nature du fil mais il est bien évident que les questions de collage et d'humidité sont également des points auxquels on doit apporter une grande attention.

La jauge est généralement constituée par un fil de constantan, alliage qui présente une réponse bien linéaire en fonction des allongements imposés; son coefficient est de l'ordre de 2 alors que celui du manganin est bien plus faible, de l'ordre de 0,6 et que celui du nichrome est, par contre, de l'ordre de 2,5, mais cet alliage est difficile à travailler.

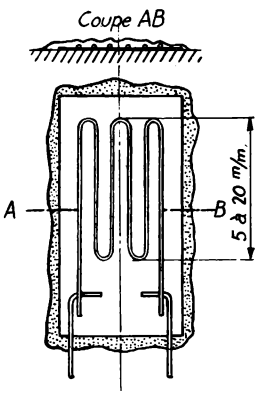


Fig. 21. - Jauge à fil résistant.

Le fil, d'un diamètre de quelques centièmes de millimètre (environ 0,02 mm), doit être bobiné très régulièrement de manière à former une sorte de gril dont les dimensions peuvent descendre à 5 ou 6 mm de côté. D'autres types de bobinage ont d'ailleurs été utilisés : en hélice, par tissage ou par moulage. Le gril est collé entre deux feuilles de papier mince à l'aide d'une colle cellulosique, par exemple, et l'on dispose ainsi d'un élément détecteur dont la résistance totale est généralement comprise entre 100 et 1000 ohms. Les connexions extérieures sont réalisées à l'aide de fils aplatis, soudés aux deux extrémités du fil résistant (fig. 21).

Par ailleurs, le vernis cellulosique peut être remplacé par une bakélite thermo-durcissable ou même par un émail, ce qui permet de faire fonctionner la jauge à des températures dépassant 600°.

La jauge doit être ensuite collée sur l'élément déformable de telle manière que l'effort absorbé par le fil soit faible devant les forces d'adhésion; la nature du support est également d'une grande

importance, tout effet de fluage devant être évité. Le collage du détecteur sur l'élément en essai est également effectué avec grand soin à l'aide d'un vernis cellulosique, d'une bakélite ou d'un émail. Si le collage est parfaitement réalisé la résistance d'isolement du fil après séchage convenable est très élevée de l'ordre de 50 à 200 mégohms et la jauge pourra, dans ces conditions, servir à mesurer aussi bien des efforts de compression que de traction jusqu'à des fréquences très élevées, (tout en se méfiant des phénomènes de fatigue). On peut aussi se placer initialement en pré-contrainte.

Par ailleurs, pour obtenir une bonne fidélité de la jauge, il faut éviter de faire travailler le fil à un allongement relatif supérieur à 0,5% et bien souvent, pour des mesures très précises de l'ordre du millième, on ne dépassera pas un taux d'allongement de 0,2%

Enfin, le gros écueil dans l'emploi des jauges à fil résistant résulte de leur coefficient de température. Pour le constantan, par exemple, le coefficient de température α est de l'ordre de 2.10^{-5}; or, si l'on veut faire des mesures à 10^{-2} près, il faut que les erreurs sur la valeur de R soient inférieures à 3.10^{-5} en prenant $\Delta\ell/\ell$ égal à $1,5\ 10^{-2}$ avec k = 2. Une différence de température de 1° conduit donc à une erreur de 0,5%; le coefficient de température global ne dépend d'ailleurs pas uniquement de celui du fil, mais également de la différence des dilatations thermiques entre le fil et son support, ce qui, théoriquement, plus que pratiquement, semble permettre une compensation. On élimine d'ailleurs les erreurs dues à la température soit à l'aide de montages à thermostats, soit, plus généralement, au moyen de montages en pont de jauges.

Dans ce but, on associe le plus souvent une jauge témoin à la jauge active collée sur la même pièce en essai donc placée à la même température, les deux résistances formant les deux branches d'un pont étant complétées extérieurement par des résistances également compensées au point de vue température.

Dans le cas des mesures statiques, le pont peut être alimenté par une tension continue, l'appareil de mesure étant un galvanomètre sensible; on arrive ainsi à un montage très simple pour lequel il suffit d'attendre avec patience que l'équilibre thermique, après mise sous tension, soit établi.

Dans le cas de mesures dynamiques, on utilise un générateur à courant alternatif de fréquence moyenne de l'ordre de 1.000 c/s et les tensions, résultant uniquement des variations d'allongement de la jauge active, sont mesurées soit par un galvanomètre sensible après redressement, soit par un oscillographe après amplification convenable (fig.22).

Signalons que dans le cas le plus courant où la jauge est collée sur un support métallique, les densités de courant admissibles dans le fil peuvent être considérables, de l'ordre de 40 A par mm^2, ce qui correspond à un courant de 20 mA pour un fil de 25 μ de diamètre.

Les mesures sont faciles à obtenir à 1 % mais il faut déjà prendre beaucoup de précautions si l'on veut descendre à 1 %.

dre à 1‰. Toutefois, la limite de précision en courant continu peut être encore portée plus loin et approche le dix-millième, ce qui nécessite un contrôle très sévère du collage de la jauge, de sa protection et de la stabilité des appareils d'alimentation et de mesure. En alternatif, la précision sur laquelle on peut compter est de l'ordre de 1% au maximum.

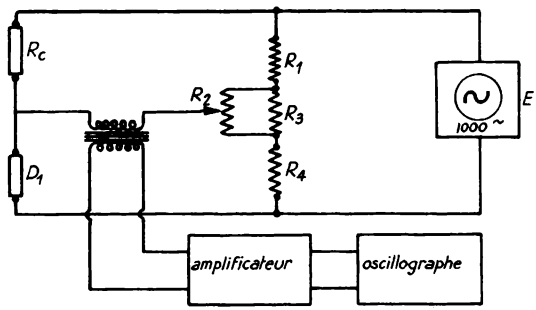


Fig. 22. - Schéma électrique d'un extensomètre à variation de résistance.

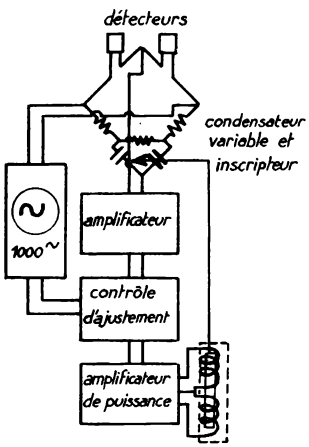


Fig. 23. - Extensomètre à variation de résistance avec inscripteur courant après son zéro

La figure 23 représente un montage particulier comportant un enregistreur courant après son zéro dans lequel l'inscripteur est solidaire du noyau du double solénoïde branché sur le circuit push-pull de sortie de l'inscripteur.

D'une manière générale, on utilise pour les mesures dynamiques une source auxiliaire de courant alternatif de fréquence F. Si la fréquence maximum des oscillations à enregistrer est f l'amplificateur doit posséder une bande passante comprise entre F - f et F + f.

De toute manière, il est nécessaire d'employer un générateur de tension alternative stabilisé en amplitude, ce qui nécessite un équilibrage à la fois ohmique et capacitif du pont.

De plus, l'amplificateur doit posséder un gain parfaitement constant dans sa bande passante. En fin de compte, il faut transformer la tension alternative de sortie en une tension continue proportionnelle à d R/R qu'il faut mesurer; il faut de plus avoir son signe et cette tension continue pourra varier avec une fréquence maximum égale à f, celle d'analyse.

Pour arriver à ce résultat, on peut déséquilibrer systématiquement le pont, détecter la tension fournie par l'amplificateur et l'opposer à une tension fixe de manière à ramener au zéro la tension de sortie. On peut également utiliser un pont de phase qui permet une détection très linéaire et fournit avec son signe la mesure de d R/R.

En fin de chaîne on utilise un amplificateur de puissance à courant continu à gain stable qui attaque l'inscripteur de mesure.

Donnons quelques indications sur le pont de phase (Brachet), fig. 24 et 25. Le générateur moyenne fréquence fournissant une tension sinusoïdale attaque simultanément le pont de mesure et le pont de phase. Le pont de mesure comporte d'ailleurs un dispositif d'équilibrage capacitif.

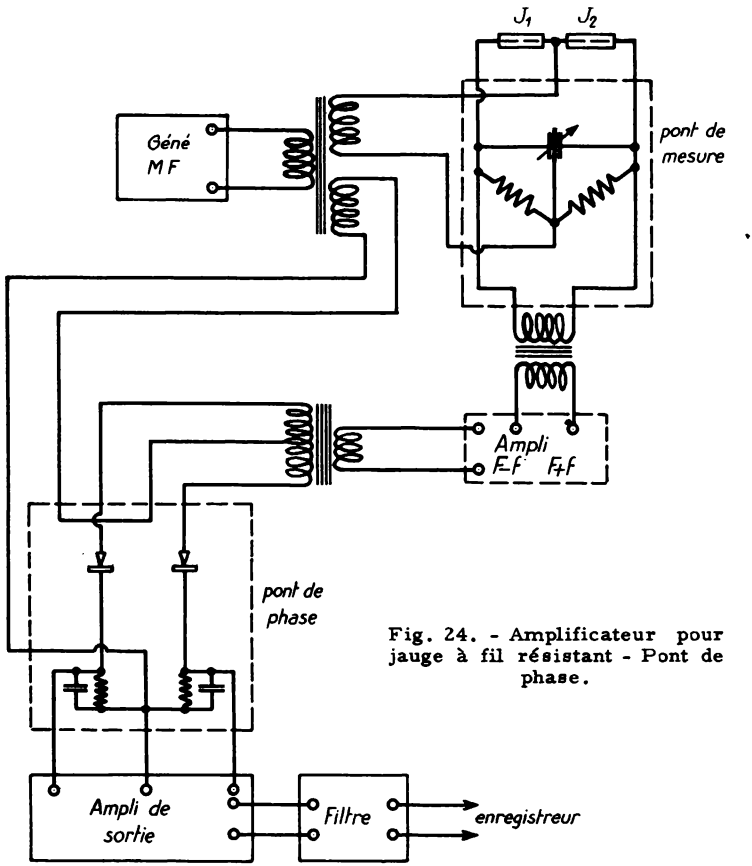


Fig. 24. - Amplificateur pour jauge à fil résistant - Pont de phase.

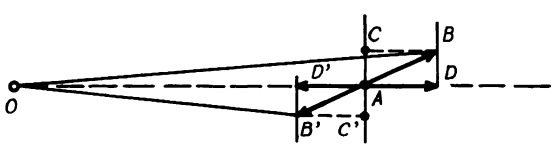


Fig. 25. - Diagramme des tensions de déséquilibre.

A la sortie du pont de mesure se trouve branché l'amplificateur qui reçoit la tension de déséquilibre pouvant provenir elle-même de 2 facteurs : une tension de déséquilibre en résistance

qui est en phase avec la tension d'attaque et une tension de déséquilibre en capacité déphasée de 90° par rapport à celle d'attaque.

Le pont de phase à 2 redresseurs démodule les tensions de l'amplificateur et annule pratiquement le déséquilibre capacitif. Dans ce but, on injecte une tension venant directement du générateur moyenne fréquence, tension qui est en phase avec la tension de déséquilibre ohmique du pont de mesure. Cette tension injectée est grande devant la tension de déséquilibre ohmique. Les tensions totales de déséquilibre (ohmique et capacitif) se décomposent en deux : les ohmiques en phase avec la tension injectée, les capacitives en quadrature. Du fait de la valeur relativement grande de la tension injectée devant celles de déséquilibre, la différence des 2 vecteurs résultants est très sensiblement égale à celle des tensions de déséquilibre ohmique, celles de déséquilibre capacitif étant faibles et en quadrature devant la tension injectée.

Enfin, le montage général comporte un amplificateur de sortie dont les caractéristiques dépendent évidemment du type d'oscillographe employé (cathodique ou bifiliaire à miroir).

Le choix de la fréquence porteuse dépend de la valeur maximum de la fréquence des oscillations à détecter (environ 4 fois supérieure à cette dernière). Elle sera aussi faible que possible pour diminuer les phénomènes capacitifs parasites.

Pour la même raison, les jauges ne doivent pas avoir un trop grand nombre de boucles, elles doivent donc avoir une résistance propre pas trop élevée (100 à 200 ohms par exemple).

Des expériences ont d'autre part été effectuées pour alimenter la jauge en impulsions brèves à grande intensité, ce qui améliore leur réponse tout en évitant l'échauffement dû à un passage permanent de courant, l'énergie totale dépensée restant faible.

Si donc les jauges à fil résistant se caractérisent par la petitesse de leurs dimensions, leur légéreté, leur robustesse, leur sensibilité, leur fidélité et leur rapidité de réponse ainsi que leur aptitude à passer de part et d'autre du zéro tout en conservant une bonne linéarité, elles nécessitent, comme des détecteurs d'autres types d'ailleurs, une alimentation indépendante et dans beaucoup de cas une chaîne d'amplification bien étudiée; de plus, de grandes précautions doivent être prises lors du collage de la jauge sur l'élément support et la protection contre l'humidité, les poussières et vapeurs diverses ne doit pas être négligée.

Elles sont actuellement utilisées pour effectuer, soit des mesures de contrainte, soit des mesures statiques de traction, ou de compression, soit des pesées (d'avions notamment), doit des mesures dynamiques de traction, flexion, couple, etc...

Utilisation des variations de self induction.

Ce dispositif est particulièrement intéressant pour la mesure des efforts : il est généralement plus encombrant que celui à variation de résistance, mais moins délicat.

Il consiste à utiliser un système de selfs à entrefer variable sous l'effet de l'effort à mesurer, la force ou le couple de rappel étant fourni par un système élastique convenablement calibré.

La variation de l'entrefer crée aux bornes des selfs une variation de tension, le circuit électrique étant alimenté à intensité constante. La mesure du déplacement fournit directement la valeur de l'effort, sans qu'il soit besoin de passer par un intégrateur.

Un dispositif analogue peut également servir pour la mesure directe de déplacements notables d'organes mobiles en employant une self à noyau droit dont le déplacement à l'intérieur de sa bobine crée une variation d'intensité dans le circuit alimenté sous tension constante. On doit, dans ce cas, utiliser au maximum les deux tiers de la longueur de la bobine pour un rapport l/d de l'ordre de 4, la sensibilité baissant notablement lorsque le noyau s'approche des extrémités de la bobine.

L'utilisation de selfs à noyau droit peut être également prévue pour la mesure de déplacements (ou d'efforts), très faibles, par modulation d'un courant de haute fréquence. Dans ce cas, la sensibilité peut être très grande, puisqu'on peut déceler des déplacements inférieurs à 1/10.000 de millimètre.

Circuit d'alimentation des selfs. - Pour des raisons d'encombrement, de faible valeur d'attraction du noyau mobile, de faible intensité de courant d'alimentation et de rapidité de réponse, on est conduit à utiliser, non pas le courant du secteur, mais un courant de fréquence moyenne (500 à 1.500 périodes par seconde). Pour l'enregistrement de phénomènes très rapides, la fréquence du courant d'alimentation peut d'ailleurs atteindre 5 et même 10.000 périodes par seconde, le générateur pouvant être constitué par une hétérodyne ou un alternateur spécial.

Schéma de principe du montage électrique. - En principe on utilise un montage en pont dont les quatre branches sont constituées, soit uniquement par des selfs, soit par deux selfs et deux résistances. A deux extrémités du pont, se trouve branchée la source alternative de fréquence moyenne et aux extrémités en croix, un redresseur débitant sur un appareil de mesure pour les valeurs moyennes, ou un oscillographe pour les valeurs instantanées (fig. 26).

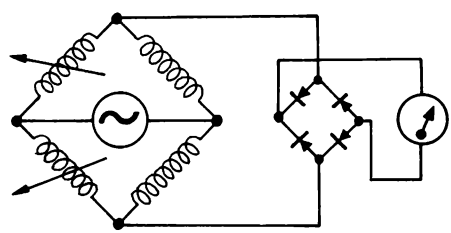


Fig. 26. - Schéma électrique d'un détecteur à variation de self induction.

Des précautions particulières doivent être prises pour compenser initialement, non seulement les valeurs des courants provenant de la fréquence fondamentale de la source électrique, mais également celles des courants provenant des harmoniques supérieurs, ce qui s'obtient, par exemple, en shuntant judicieusement un des bras du pont par une capacité variable appropriée.

En pratique, les mesures peuvent être effectuées avec une précision de l'ordre de 0,5% en conservant des déplacements n'excédant pas 2/10 de millimètre, mais on peut descendre bien plus bas si la nécessité s'en fait sentir.

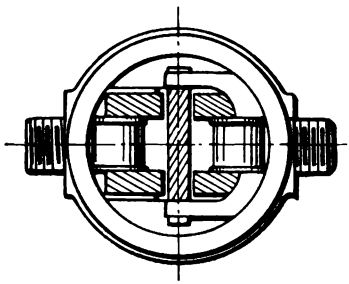


Fig. 27. - Dynamomètre à variation de self induction.

La figure 27 représente un dynamomètre à selfs.

L'emploi des poudres de fer agglomérées, puis de ferrites, a permis de réaliser des détecteurs à variation de self de très faible encombrement en utilisant comme circuit magnétique des éléments du commerce, soit en forme d'U, soit en forme de cuvette; de plus, les diverses pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont très faibles; ces dispositifs peuvent être excités s'il est nécessaire en courants de fréquence assez élevée.

Ces dispositifs de mesure par variation de selfs peuvent être employés comme dynamomètres simples, dynamomètres pour balance aérodynamique, mesureurs de couple, torsiographes, etc... Un très gros avantage du système réside dans ce fait que l'étalonnage peut s'effectuer statiquement.

Variation d'induction mutuelle. - On remplace dans ce dispositif la variation de selt-induction par une variation d'induction mutuelle, ce qui présente l'avantage supplémentaire de permettre d'effectuer des sommations en connectant les détecteurs en série, de même sens ou de sens opposé. Les derniers modèles d'appareils complètement blindés, et par la même insensibles aux variations de champ extérieur, peuvent servir à mesurer par variation de leur entrefer les grandeurs très diverses déjà énumérées.

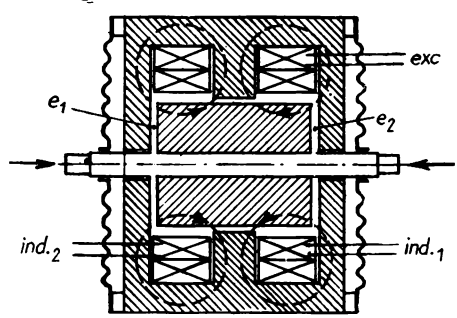


Fig. 28. - Accélérographe à induction mutuelle.

Un accélérographe, par exemple, comprendra une partie mobile constituée par un cylindre en fer doux (fig.28), maintenue en position d'équilibre par des membranes élastiques à l'intérieur d'un cylindre également en fer doux servant de logement aux enroulements d'excitation et à ceux d'induit - (pour des fréquences élevées, les circuits magnétiques en fer doux sont remplacés par des ferrites). Le déplacement du cylindre central servant d'axe à l'ensemble du détecteur provoque une augmentation de l'entrefer d'un côté et une diminution de l'autre; on revient d'ailleurs au fond aux dispositifs à self variable dans lesquels on utilise deux enroulements séparés au lieu d'un seul. En alimentant en série les deux enroulements d'excitation par une tension de fréquence moyenne de

l'ordre de 1.000 c/s, on obtient, aux bornes des deux secondaires, des tensions V_1 et V_2 (fig.29) qui varient en sens inverse quand le noyau central se déplace, on redresse ces deux tensions et on oppose les deux tensions redressées $V_2' - V_1'$. On s'arrange pour que la tension résultante soit proportionnelle au déplacement du cylindre central et on mesure sa valeur, soit à l'aide d'un appareil à lecture directe, soit à l'aide d'un oscillographe à miroir.

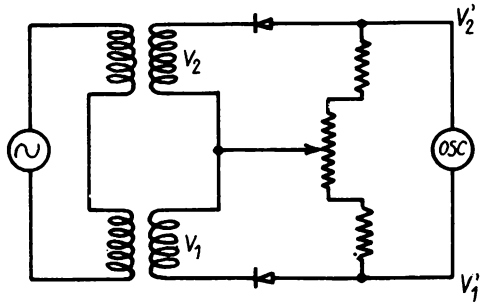


Fig. 29. - Schéma de montage - Détecteur à variation d'induction mutuelle.

Au lieu de décaler franchement le zéro pour obtenir le sens du paramètre en étude et pour éviter simultanément le résidu de zéro et la courbure initiale de la réponse du redresseur, on peut faire débiter chaque enroulement secondaire sur un redresseur en pont, par exemple, et brancher les séries de redresseurs sur une résistance, elle-même montée en pont, aux bornes de laquelle on branchera l'appareil de mesure. Dans ce cas, on détecte d'abord et on oppose ensuite, les redresseurs travaillent ainsi dans des conditions bien déterminées et la stabilité de l'ensemble est excellente (fig.30).

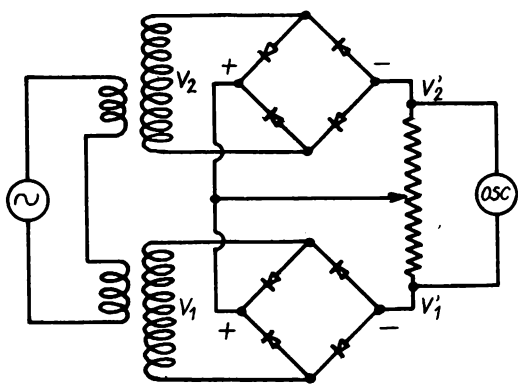


Fig. 30. - Autre schéma à variation d'induction mutuelle.

Pour des mesures basse-fréquence, on peut sortir 30 à 40 microampères pour un déplacement du noyau de 1/1000 de mm. Comme on peut admettre des déplacements de l'ordre de 1/10

de mm,on peut effectuer jusqu'à des fréquences d'environ 200 c/s des enregistrements directs avec un oscillographe à miroir de caractéristiques convenables.

Méthode d'induction.

Cette méthode de mesure concerne principalement les accélérations en régime variable; elle s'applique donc à la mesure des vibrations de fréquence supérieure à quelques périodes par seconde.

Le montage du détecteur est le même que celui décrit ci-dessus dans lequel, toutefois, le circuit d'excitation est alimenté en courant continu (fig.31). Le déplacement du noyau provoque des variations de flux qui créent dans les enroulements induits des forces électromotrices proportionnelles à la vitesse de déplacement du noyau central. Si on applique cette f.e.m. aux bornes d'un oscillographe monté en intégrateur (fluxmètre), les indications de cet appareil restituent directement le mouvement de la partie mobile. On peut d'ailleurs utiliser un oscillographe très

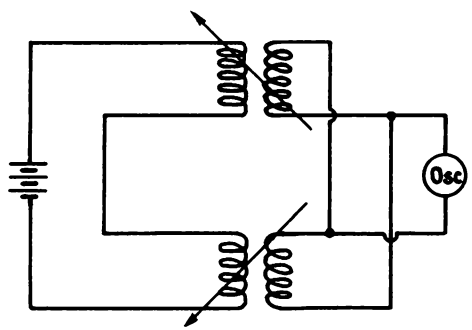


Fig. 31. - Schéma de l'utilisation de la méthode d'induction.

amorti travaillant autour de sa fréquence propre d'oscillation, bande dans laquelle il fonctionne en intégrateur. Pour mesurer une accélération, on monte donc le détecteur en accélérographe en lui donnant une fréquence propre d'oscillation élevée par rapport aux fréquences des accélérations à mesurer. Les tensions induites dans les circuits secondaires sont alors proportionnelles aux dérivées de l'accélération (à sa vitesse). On connecte aux bornes de ce circuit secondaire un oscillographe hyper amorti (4 fois l'amortissement critique environ) - cet amortissement étant d'ailleurs obtenu grâce à un rapport déterminé des résistances internes du détecteur et de l'oscillographe. Dans ces conditions, l'oscillographe fonctionne en intégrateur dans une large bande de fréquences et la déviation obtenue est donc finalement directement proportionnelle à l'accélération à mesurer. D'où un montage très simple de mesureur d'accélérations périodiques (vibrations). Domaine de fréquences 8 à 120 c/s, domaine de sensibilité : ± 2 g avec 20 mm par g sur l'enregistrement.

Emploi de potentiomètres.

Dans le cas où le déplacement de la partie mobile de l'organe détecteur (masselotte d'un accélérographe, par exemple) est supérieur au mm, son mouvement peut commander, par un système de multiplication mécanique, la position d'un très léger curseur frottant sur un potentiomètre; le bobinage de celui-ci comporte des spires de fils jointifs de très faible diamètre, inoxydables et de résistivité suffisante : platine iridié, palladium, etc...

Le système de multiplication peut être supprimé si l'amplitude de l'organe mobile dépasse quelques millimètres; les variations de tension du potentiomètre sont appliquées à un oscillographe, généralement sans interposition d'un amplificateur.

Des potentiomètres circulaires, de faible encombrement, et de très faible couple (0,2g-cm) (microfriction) commercialisés peuvent être montés sur des appareils de type divers.

Emploi d'une cellule photoélectrique.

La cellule photo-électrique peut également être employée pour effectuer des mesures de déplacements ou d'efforts et l'on doit à Labarthe le premier manographe photocathodique de laboratoire pour mesure des variations de pression à l'intérieur des cylindres de moteurs.

Le principe de sa méthode consiste à utiliser une membrane circulaire spécialement traitée de 1 centimètre carré environ de surface et de 1 millimètre d'épaisseur convenablement encastrée par serrage entre deux pièces de tour et dont l'une possède un filetage permettant sa fixation sur la culasse du moteur, en remplacement d'une bougie, par exemple.

La membrane circulaire est ainsi soumise directement aux variations de pression du cylindre et la déformation qu'elle subit a pour effet de transformer sa surface extérieure, parfaitement polie, en un miroir convexe de courbure variable avec la pression.

Des précautions particulières (refroidissement énergique) doivent être prises pour éviter que les variations de température ne viennent fausser les mesures en modifiant les caractéristiques élastiques de la membrane.

Il est bien certain qu'un tel organe possède une fréquence propre très élevée qui permet la détection des variations très rapides de pression résultant de l'apparition des phénomènes de détonation.

Le montage optique (faisceau de rayons parallèles rendu divergent suivant la courbure de la membrane) et le montage électrique sont explicités par la figure 32.

Cette installation utilisable au point fixe ne l'est plus pour effectuer des essais sur un moteur fonctionnant sur un véhicule quelconque en raison de la difficulté de former un tout rigide insensible aux trépidations de l'ensemble source lumineuse, membrane, cellule photoélectrique.

L'utilisation de la cellule photoélectrique a été reprise sous la forme d'un comparateur photo-électrique pour la mesure de très faibles déplacements (ou indirectement d'efforts) d'après le principe dû à MM. ROURE, QUEVRON et GUISE.

Un système optique donne d'une fente mécanique de quelques centièmes de millimètre fortement éclairée une image réelle réduite à 15 mm environ.

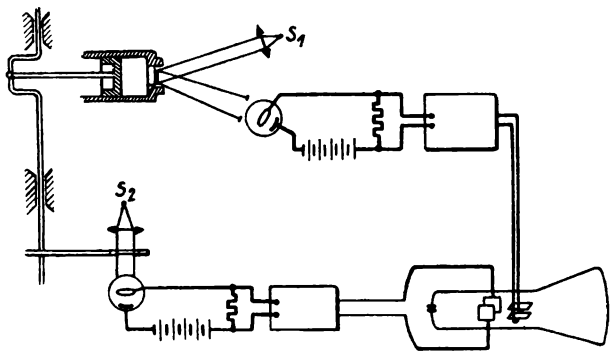


Fig. 32. - Manographe Labarthe à cellule photoélectrique.

Un couteau à tranche parfaitement rectiligne solidaire de la tige du palpeur vient couper la lumière dans le plan de cette image. La variation d'intensité lumineuse est enregistrée par une cellule photoélectrique qui actionne un appareil de mesure par l'intermédiaire d'un amplificateur. Cet instrument rappelle le lecteur de son cinématographique, mais il peut servir à la mesure de très faibles déformations, à étudier la surface d'un métal travaillé, à contrôler l'épaisseur de fils en cours de fabrication, etc...

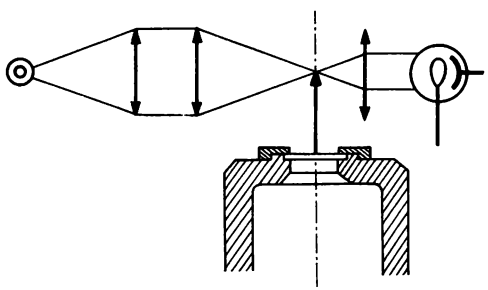


Fig. 33. - Manographe Ricardo à cellule photoélectrique.

Le commerce fournit un tel dispositif, d'encombrement très réduit, pouvant se monter directement comme un manographe sur un cylindre de moteur. Le déplacement du couteau qui obture le faisceau lumineux est directement commandé par les déformations de la membrane elle-même soumise aux variations de pression à étudier. Ce dispositif a nécessité la mise au point de sources lumineuses et, de cellules photoélectriques de très petit volume insensibles aux vibrations (fig. 33).

Il est évident que ces montages nécessitent une très grande stabilité du flux lumineux, d'où l'emploi d'une source de courant électrique de très grande constance.

Procédés d'enregistrement photographique direct des déformations.

Ces dispositifs, tous basés sur la transformation d'une translation et une rotation d'un miroir réfléchissant un rayon lumineux, sont bien connus et ne nécessitent pas de descriptions détaillées. Certains sont d'ailleurs signalés dans d'autres chapitres.

Décrivons seulement, à titre d'exemple, un MANOGRAPHE OPTIQUE destiné à enregistrer la vitesse instantanée des courants d'air par variation de pression.

On emploie comme détecteur un tube analogue à un tube de Pitot (ou un tube de Denis Gruzon, anémoclinomètre Kampe de Fériet, etc..) fournissant une pression dynamique et une pression statique, la différence entre ces deux valeurs conduisant à la détermination de la vitesse de la veine gazeuse.

Ces deux pressions sont transmises à un manographe à miroir constitué par deux chambres de faible volume séparées par une membrane métallique, plissée. Le déplacement de celle-ci sous l'effet de la différence des pressions commande la rotation d'un petit miroir au moyen d'un dispositif multiplicateur explicité par la figure 34.

Dans ces conditions, on peut enregistrer facilement des variations de pression de l'ordre du millimètre d'eau. De nombreux appareils enregistreurs peuvent être dérivés de ce modèle type (variomètre, enregistreurs de turbulence, etc...).

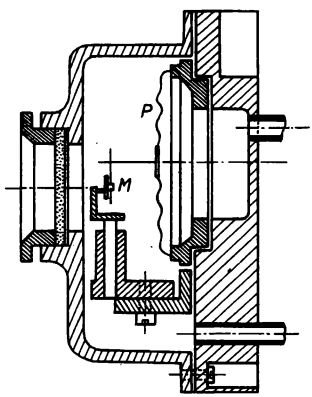


Fig. 34. - Manographe optique.

La membrane anéroïde peut d'ailleurs être remplacée par un tube métallique souple (tube thermostatique).

Bien d'autres procédés de détection peuvent être envisagés et nous ne signalerons que pour mémoire l'emploi de fils tendus dont on mesure les variations de fréquence de vibration en fonction des efforts appliqués, les phénomènes de thermo-électricité, le pick-up électronique fonctionnant par variation de position des électrodes d'une lampe sous l'effet d'une accélération, etc...

ENREGISTREMENT DU TEMPS

L'enregistrement d'un phénomène quelconque est très souvent effectué en fonction du temps, d'où la nécessité d'enregistrer simultanément ce dernier facteur même dans le cas où le déroule-

ment du papier ou du film s'effectue à une vitesse constante et connue, l'inscription du temps fournissant un repère commode qui peut être d'une très grande précision.

Suivant la vitesse de déroulement du papier ou du film photographique, on peut être amené à enregistrer le temps à la minute près, à la seconde ou à une fraction de seconde pouvant descendre bien au-dessous du 1/1.000.

Chacune de ces échelles nécessite un dispositif spécial de compte-temps.

Enregistrement de l'heure.

Dans certains cas, on aura besoin d'enregistrer l'heure exacte à laquelle le phénomène intéressant s'est produit.

Un procédé simple consiste alors à photographier le cadran d'un chronomètre pendant un temps court.

La figure 35 indique le montage à réaliser.

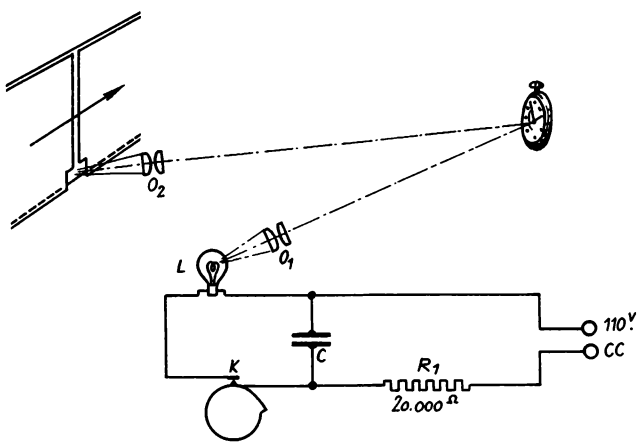


Fig. 35. - Enregistrement de l'heure sur une bande de papier photographique.

On décharge en un temps très court, un condensateur C au moyen d'un contact K produit soit par le phénomène lui-même, soit par une came montée par exemple, sur l'axe du cylindre d'enregistrement.

La lampe L éclaire fortement le cadran du chronomètre au moyen d'une lentille O_1 et l'image réduite du cadran est photographiée sur la bande photographique au moyen d'un objectif O_2 .

Le condensateur peut être rechargé lentement à travers une résistance de grande valeur R_1 .

Enregistrement de la seconde et d'une fraction de seconde supérieure au 1/10 de seconde.

Cet enregistrement peut s'effectuer de plusieurs manières :

- soit par compte-temps,

- soit par secteur denté.

Le compte-temps utilisé peut provoquer directement une très faible rotation d'un petit miroir qui créera un accident rapide sur la bande photographique. Le compte-temps peut encore éclipser et découvrir un miroir fixe à une cadence déterminée.

Il est souvent préférable d'utiliser un compte-temps fournissant des contacts à la cadence désirée : 1 seconde, 1/5 ou 1/10 de seconde. Ces contacts ferment le courant sur l'enroulement d'un petit électro-aimant dont la partie mobile porte un miroir de faible surface. La rotation de ce miroir provoquera un accident de même cadence sur la bande d'enregistrement.

L'emploi d'un secteur denté tournant à une vitesse constante (moteur synchrone, par exemple) permet d'obtenir des traits lumineux à des intervalles de temps déterminés par la vitesse de rotation du disque et le nombre de fentes qu'il comporte. Un système de lentilles permet de reprendre le faisceau traversant les fentes mobiles du disque en les projetant sur une fente fixe. L'image de cette dernière est à son tour projetée sur le film d'enregistrement.

Enregistrement d'une fraction de seconde comprise entre 1/50 et 1/1.000 de seconde.

Dans ce cas, on doit avoir recours à un diapason de fréquence déterminée entretenu oú non électriquement, soit par contact, soit par oscillateur à lampe et dont une branche porte un petit miroir. Le rayon réfléchi produira une sinusoïde sur la bande photographique.

Si l'on désire des tops lumineux rectilignes à la cadence de 1.000 par seconde par exemple, on pourra utiliser un montage analogue à celui qu'employa DUFOUR, dans son premier type d'oscillographe cathodique :

Les branches du diapason D sont munies de deux écrans en aluminium présentant chacun une fente assez fine, ces deux fentes coïncidant lorsque la vitesse des branches du diapason est maxima (fig. 36).

Le faisceau lumineux issu d'une lampe à filament rectiligne survoltée ou d'un arc passe à travers ces fentes et est repris par une lentille L_1 qui fournit du filament une image en l_1. Un obturateur peut être facilement placé en cet endroit de manière à régler la durée de passage du faisceau pendant un temps déterminé.

Ce faisceau est repris par une lentille L_2 devant laquelle se trouve une fente fixe F_2 dont la position est telle que F_2 soit

l'image de F_1 par rapport à L_1. La lentille L_2 concentre le faisceau lumineux dans la région d'une troisième lentille L_3 qui reforme finalement l'image de L_2 sur le film se déplaçant à grande vitesse.

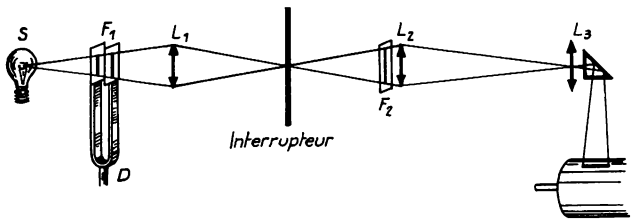


Fig. 36. - Enregistrement du temps (1/5 à 1/1.000 sec.) système Dufour.

Quand le diapason vibre, la fente F est éclairée périodiquement pendant un temps très court et les éclairs successifs sont inscrits sur le film sous forme de traits nettement définis.

ENREGISTREMENT DES TEMPS TRÈS COURTS (inférieurs au 1/10.000 seconde).

Le problème a été résolu, par exemple, au moyen du chronographe piézoélectrique Tawill constitué de la manière suivante :

Un faisceau lumineux monochromatique polarisé rectilignement traverse une lame de quartz piézoélectrique en vibrations longitudinales entretenues par résonance au moyen d'une hétérodyne (fig. 37).

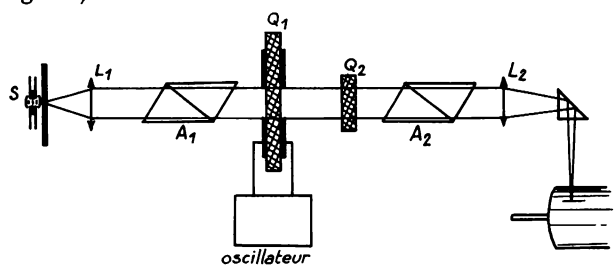


Fig. 37. - Chronographe piézo-électrique Tawill (1/10.000 sec.).

Le rayon lumineux traverse la lame Q_1 suivant un axe électrique, l'axe optique étant de plus perpendiculaire à deux faces de la lame. Ce rayon traverse ensuite une deuxième lame du quartz Q_2 de même épaisseur que la première destinée à compenser la biréfringence, puis un analyseur A_2 réglé de manière à obtenir finalement un champ obscur en l'absence de vibrations de la première lame. Sous l'effet des vibrations entretenues, il se produira aux régions nodales une biréfringence intermittente de même période que celle de la vibration mécanique de la lame. A la sortie de l'analyseur, on se trouve en présence d'une succession d'éclairs à la même fréquence. Il est facile de concentrer ce faisceau sur

une bande photographique tournant à grande vitesse et d'obtenir ainsi, avec une très grande précision, une succession de points à une fréquence de 50 kc/s.

L'inscription comporte également à volonté des points ou bandes de repérage de temps à la fréquence de 10.000; on peut ainsi mesurer par interpolation des intervalles de temps très courts avec un pouvoir séparateur de l'ordre de $2\ 10^{-7}$ sec.

Enregistrement de courts intervalles de temps.

Le chronographe piézoélectrique Tawill, complété comme suit, peut servir à l'enregistrement de courts intervalles de temps. On conserve la base de temps décrite ci-dessus, à laquelle on adjoint un système de deux cellules de Kerr (au nitrobenzène purifié) excitées par des lampes amplificatrices dont les grilles sont polarisées par un montage de bascule électronique. On s'arrange de telle manière que les signaux de départ et d'arrivée provoquent l'extinction très rapide de l'une, puis de l'autre cellule, l'extinction étant beaucoup plus brève que la réapparition de la lumière à travers la cellule. Les inscriptions des tops et de la base de temps sont enregistrées sur un film photographique plaqué à l'intérieur de la jante d'un disque dont la vitesse périphérique peut atteindre 50 et même 100 m/s. Le système optique peut être commun à l'inscription des tops caractérisant le début et la fin du phénomène et à celle du temps.

On peut également enregistrer la durée d'un phénomène très court en photographiant une roue tournant à une vitesse connue, bien constante, portant des repères violemment éclairés par des lampes flash à gaz ionisé excitées par le début et la fin du phénomène en étude.

Compteurs de temps mécaniques.

D'autre part, le repérage et l'enregistrement d'un instant déterminé, pris par rapport à une origine de temps, peuvent s'effectuer par des moyens, soit mécaniques, soit électriques, ou une combinaison des deux, suivant l'éloignement de l'instant à repérer par rapport à l'origine du temps et suivant le degré de précision désiré.

On peut donc jusqu'à des précisions du centième de seconde, utiliser des chronographes imprimeurs entraînés à des vitesses constantes connues au moyen d'un moteur synchrone, par exemple; ces compteurs permettent, par démultiplications successives et entraînement pas à pas, d'inscrire le temps au centième de seconde pendant une durée de 24 heures.

Compteurs de temps électroniques.

Pour des précisions plus grandes, on a recours aux chronographes imprimants électroniques, dont la base de temps est constituée par une source de tension à la fréquence étalon de 1.000 c/s transformés en impulsions brèves. Les millièmes et

centièmes de seconde sont inscrits sur des compteurs électroniques et les dixièmes de seconde, secondes, minutes et heures sur des roues entraînées sur des dispositifs pas à pas. L'instant correspondant à l'arrivée de l'impulsion créée par le phénomène a pour effet de provoquer l'arrêt de l'arrivée du courant à fréquence 1.000 par seconde.

D'autre part, un chronographe purement électronique se compose, en principe, d'un générateur d'impulsions transformant la tension sinusoïdale de l'oscillateur en impulsions brèves, d'un compteur électronique et d'un interrupteur électronique; le système de comptage comprend un certain nombre d'échelles de numération, chacune d'elles possédant N états stables correspondant à l'un des nombres compris entre zéro et N - 1. Un montage en cascade de p échelles donne une capacité totale de $(N^p - 1)$, chacune des chaînes transmettant une impulsion de comptage à la suivante en passant de l'état N - 1 à l'état zéro.

La numération peut s'effectuer, soit dans le système binaire, soit dans le système décimal, plus pratique pour de simples machines statistiques; la précision est donnée par la stabilité de l'oscillateur à quartz qui est de l'ordre de 10^{-5}.

Enregistrement du temps par balayage spiral sur un oscillographe cathodique.

Dans ce montage, chaque spire, projetée sur le fond de l'oscillographe, comporte un certain nombre de points correspondant à la période d'oscillation, par exemple 10^{-5} de seconde et chacun de ces points se retrouve exactement sur le même rayon des spires suivantes, l'ensemble de l'oscillogramme se présente sous la forme d'une roue à rayons interrompus. Cet oscillogramme est déclenché, puis arrêté par le début et la fin du phénomène dont on veut mesurer la durée. Celle-ci est obtenue en comptant le nombre de spires complètes (entier ou fractionnaire) et en multipliant par le nombre constant de points par spire (à la fréquence d'oscillation).

Inscription du temps sous forme de lignes d'ordonnées occupant toute la largeur du papier photographique.

Lorsqu'on dispose d'un enregistreur muni d'une fente étroite, on peut éclairer celle-ci uniformément pendant un temps très court par la décharge instantanée d'un condensateur dans une lampe convenablement placée. Le condensateur est rechargé lentement entre deux éclairs successifs.

DISPOSITIF D'ENREGISTREMENT PERMETTANT L'INSCRIPTION D'UN GRAND NOMBRE DE PARAMÈTRES SUR LA MÊME BANDE

Dans le cas d'enregistrements simultanés d'un grand nombre de paramètres, il n'est plus possible, sans risque de chevauche-

ment, donc de confusions, d'inscrire chacun d'eux sous la forme d'une courbe d'assez grande amplitude.

Pour tourner cette difficulté, M.HUSSENOT, Ingénieur de l'Aéronautique, a mis au point un enregistreur pour essais d'avions en vol, qui comporte une quarantaine d'inscriptions simultanées, et dans lequel on transforme les amplitudes en nombres variables de tops (ou de crochets carrés) par unité de temps. Ces crochets sont produits par la déviation d'un faisceau lumineux tombant sur des miroirs dont chacun est solidaire de la palette d'un petit électro-aimant, très léger et de réponse rapide.

Le temps est, de plus, inscrit en secondes ou en multiples ou sous-multiples de la seconde.

Les valeurs des différents paramètres sont ainsi reproduites fidèlement, quelles que soient les variations de température ou de tension de la source d'alimentation.

En principe, chaque électro-aimant est double. Il comporte donc : 2 palettes portant chacune un miroir fournissant des spots lumineux coïncidant au repos et dont les déviations sont de sens opposés en période d'excitation.

Les quarante inscriptions se présentent ainsi sous l'aspect de vingt traits parallèles distants d'environ 4 millimètres, les amplitudes opposées de chacun des spots étant d'environ 1,5 mm, de manière à éviter tout chevauchement.

Pour enregistrer un mouvement quelconque, on le ramène à la rotation d'un disque pouvant faire plusieurs tours; deux balais calés à 90° frottent sur ce disque dont une moitié est isolante et l'autre conductrice; chacun des balais est réuni à une des bobines des électro-aimants doubles donnant des déviations de sens inverse. La cadence des contacts et leurs dispositions relatives permettent de reproduire la courbe du phénomène à étudier (méthode des gammes de M.HUSSENOT).

On peut également utiliser un frotteur tournant d'un mouvement uniforme qui vient rencontrer successivement deux plots, l'un fixe et l'autre mobile, l'écart entre les deux étant proportionnel à l'amplitude du paramètre à mesurer (méthode du balayage).

Le roulement de deux petits disques mi-partie conducteurs, mi-partie isolants sur une sphère métallique tournant autour d'un axe permet encore d'inscrire les faibles variations d'un paramètre. Dans ce but, les deux balais sont calés en permanence à 90° l'un de l'autre et l'axe de rotation de la sphère de roulement peut s'incliner, sous l'effet du phénomène à inscrire, dans le plan diamètral passant par les points de contact des roulettes. Il en résulte des nombres de crochets variables en fonction de l'inclinaison de cet axe.

Enfin, il est souvent facile de concevoir des dispositifs mécaniques simples, fournissant des nombres de contacts par unité de temps fonctions de l'amplitude du facteur à mesurer (déplacement, pression, nombre de tours par seconde, etc...).

Dans bien des cas, les contacts électriques peuvent être remplacés par des écrans (miroirs tournants) obturant des faisceaux lumineux tombant sur des cellules photoélectriques.

Il est évident qu'on ne peut obtenir par ce procédé que des valeurs moyennes et non des valeurs instantanées, mais la méthode peut rendre de très grands services dans des cas extrêmement variés.

ENREGISTREMENT DES PHÉNOMÈNES TRÈS RAPIDES

Les phénomènes très rapidement variables peuvent, au point de vue de leur enregistrement, être classés en deux catégories bien distinctes :

- La première comprend des phénomènes généralement d'ordre mécanique pouvant être photographiés directement.

- La seconde concerne des phénomènes périodiques ou non, le plus souvent d'ordre électrique, pouvant finalement être transformés en une variation de tension électrique dont l'enregistrement nécessite l'emploi d'un oscillographe cathodique.

ENREGISTREMENTS PHOTOGRAPHIQUES DIRECTS

L'enregistrement direct d'un phénomène, le plus généralement d'ordre mécanique, peut souvent être effectué par photographie ou même par cinématographie à grande vitesse (ultracinéma).

Il est évidemment indispensable d'éclairer très fortement l'organe en mouvement, et bien des montages, à éclairement constant ou discontinu, peuvent être utilisés dans ce but.

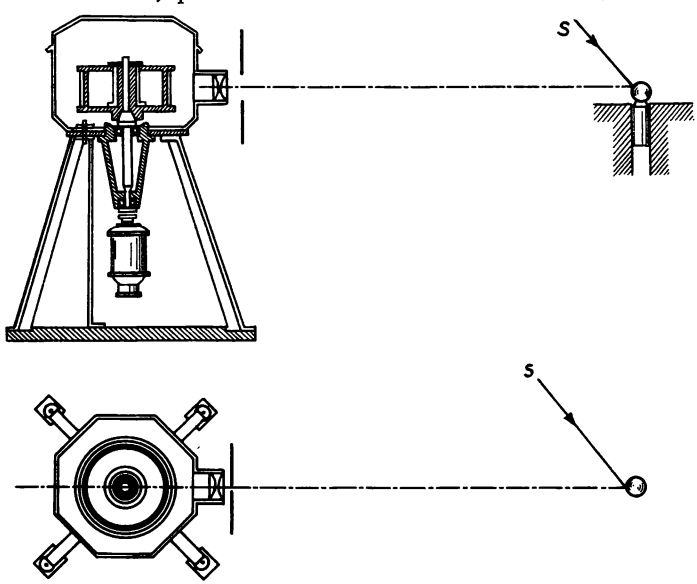


Fig. 38. - Accélérographe à sphère polie (Ingénieur Général Libessart) et enregistreur Seguin.

Rentre, par exemple, dans cet ordre d'idées, l'enregistrement direct sur plaque mobile ou sur tambour tournant de la vitesse d'un projectile éclairé par le soleil.

Comme il ne s'agit que de connaître la vitesse du mobile, l'Ingénieur général LIBESSART utilise, dans ce cas, des accélérographes à sphère polie donnant un tracé extrêmement fin (fig.38). Le temps est inscrit simultanément, soit au moyen d'un diapason entretenu électriquement, soit au moyen d'un chronographe piézo-électrique.

L'industrie fournit, d'ailleurs, des enregistreurs photographiques constitués par un tambour de grand diamètre tournant à grande vitesse permettant d'atteindre des vitesses linéaires de l'ordre de 100 m/sec et munis d'objectifs d'ouverture et de distance focale variable suivant les conditions d'utilisation (l'objectif a couramment un foyer de 0,50 m).

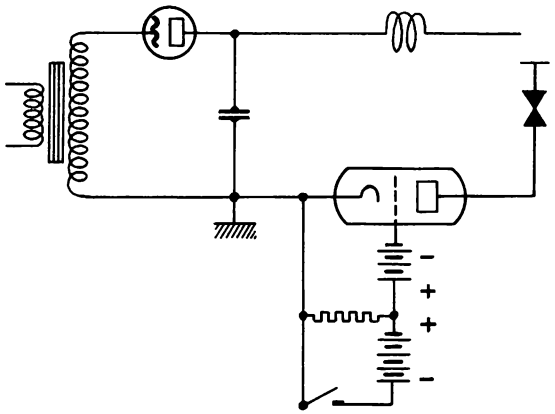


Fig. 39. - Générateur à étincelle condensée, commandée par thyratron.

Un autre procédé, bien connu, consiste à éclairer l'organe ou le projectile en mouvement à des intervalles de temps rapprochés et pendant un temps très court.

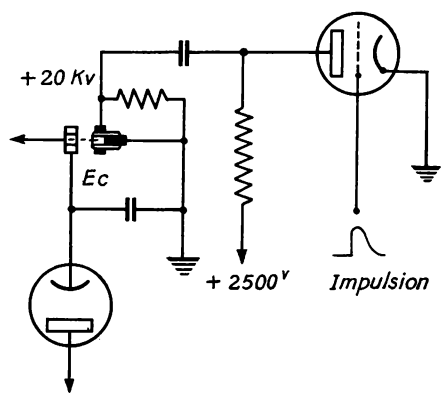


Fig. 40. - Commande électronique d'un générateur à étincelle condensée.

On utilise, à cet effet, comme source lumineuse, une étincelle condensée fournie par la décharge aussi instantanée que possible d'un condensateur chargé sous haute tension. Ce condensateur chargé par un dispositif redresseur est déchargé à une cadence déterminée en agissant, par exemple, sur la grille d'un thyratron (fig. 39), soit à l'aide d'une étincelle pilote, soit par éclateur tournant, soit par un dispositif électronique (fig.40).

Mais l'expérience montre que si l'on veut des étincelles très brèves d'une durée de l'ordre du millionième de seconde, on ne peut compter dissiper une énergie électrique trop considérable dans l'étincelle. Il faut donc combiner au mieux le nombre d'étincelles par seconde et l'énergie dissipée par étincelle. Pratiquement, on peut obtenir jusqu'à 10.000 étincelles par seconde, le circuit de décharge comprenant un condensateur de 0,1 microfarad environ chargé sous environ 10.000 V.

Les photographies de balles traversant une plaque de verre, celles de tourbillons derrière hélices d'avions obtenues par M. VALENSI en admettant de la fumée dans la veine d'air sont une application très démonstrative de cette méthode d'enregistrement instantané.

Il existe d'ailleurs deux types bien différents de générateurs d'étincelles :

Le générateur d'étincelles pour photographie unique, ou à cadence lente, et le générateur d'étincelles pour prise de vues à cadence rapide, mettons supérieurs à quelques dizaines de milliers par seconde.

Le schéma (n° 39) se rapporte à la première catégorie de générateurs : la cadence des étincelles est lente. Dans le cas de photographies par transparence, on peut employer un condensateur dont la capacité reste de l'ordre indiqué ci-dessus, soit 0,1 μ F, sa tension de charge pouvant atteindre 20.000 V. Des connexions très courtes permettent alors d'obtenir des durées utiles d'éclair de 10^{-7} sec., l'amorçage étant obtenu par excitation commandée.

D'ailleurs, signalons accessoirement que pour la cinématographie rapide par réflexion (3.000 à 5.000 images par sec.) il est nécessaire d'utiliser des sources lumineuses extrêmement intenses : lampes à incandescence de 1000 watts très poussées, tubes à xénon, à krypton ou à vapeur de mercure sous pression et lampes flash contenant des copeaux de magnésium dans l'oxygène.

Les générateurs électroniques d'étincelles pour cinéma à cadence très rapide sont beaucoup plus difficiles à réaliser, ils dérivent pratiquement de deux schémas de montage différents.

a) - On charge sous haute-tension un condensateur de forte capacité formant réservoir qui se décharge à travers une résistance dans un condensateur de capacité beaucoup plus faible. Une étincelle jaillit aux bornes de l'éclateur branché sur ce dernier condensateur lorsque sa tension atteint celle d'éclatement : la cadence des étincelles est définie par la valeur des capacités et de leur résistance de liaison (Schatte-Schlieren) (fig.41).

L'inconvénient de cette méthode résulte du fait que la fréquence des étincelles ne reste pas constante et qu'il existe un courant de charge non nul entre deux étincelles, d'où amorçage possible et nécessité de souffler.

Cet inconvénient a pu être éliminé en contrôlant un courant de charge moyen d'un tube à vide (DEVAUX L.C.A.) On a pu obtenir, ainsi, soit 200 images à la cadence de 50.000 par seconde avec une capacité de 1 μ F sous 10.000 V se déchargeant dans un

condensateur de 0,001 μ F, soit 75 images à la cadence de 25.000 avec une capacité de 3 μ F chargée sous 30.000 V se déchargeant dans un condensateur de 0,3 μ F.

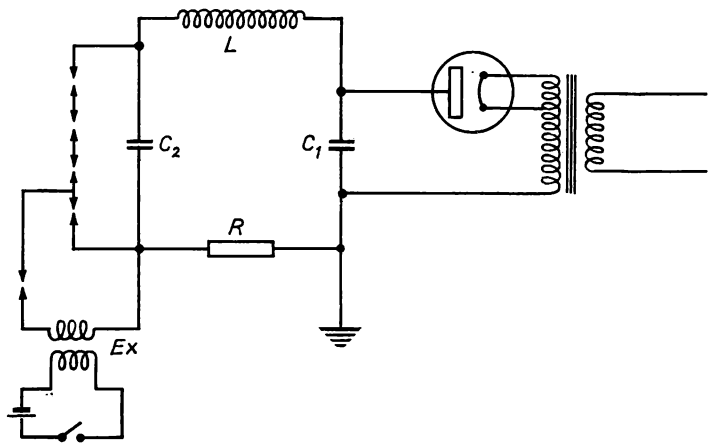


Fig. 41. - Générateur d'étincelles multiples à condensateur réservoir.

a) - On utilise d'autre part un montage dérivé de celui de CRANZ - SCHARDIN - VOLLRATH. Ce générateur d'étincelles comporte des éclateurs et objectifs en nombre égal à celui des éclairs, les amorçages successifs de chaque éclateur s'obtiennent à l'aide de circuits de retardement comportant divers types de couplages (couplage inductif entre les condensateurs, par exemple - fig. 42) ou par l'emploi d'étincelles glissantes se commandant en cascade.

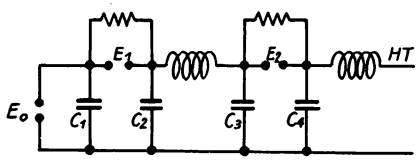


Fig. 42. - Générateur d'étincelles à couplage inductif.

Une étincelle glissante est, en principe, constituée par deux électrodes principales annulaires disposées à l'extérieur d'un tube semi-conducteur (verre, par exemple), une troisième électrode interne sert d'électrode d'amorçage. La tension du condensateur de charge est insuffisante pour provoquer un arc entre les deux électrodes principales suffisamment éloignées l'une de l'autre (plusieurs centimètres). L'amorçage a lieu en produisant une impulsion entre l'électrode centrale et l'électrode principale la plus proche. Une intense ionisation de l'air se produit à la surface du semi-conducteur et la gaine d'ions progresse vers la deuxième électrode principale provoquant la décharge au moment où elle l'atteint. L'émission lumineuse intense est très courte et se produit toujours dans les mêmes conditions d'excitation. Le retard apporté à l'apparition de la décharge peut être, de plus, utilisé pour la commande en cascade de diverses étincelles (fig. 43).

Enfin, la commande des étincelles successives peut être effectuée par des circuits de retard constitués au moyen de thyratrons d'amorçage. Ceux-ci sont déclenchés à l'aide de circuits retardateurs dont on reste maitre de la constante de temps (L.C.A.). Ce dispositif a permis d'obtenir 20 à 30 étincelles à des fréquences pouvant atteindre 500.000 par seconde.

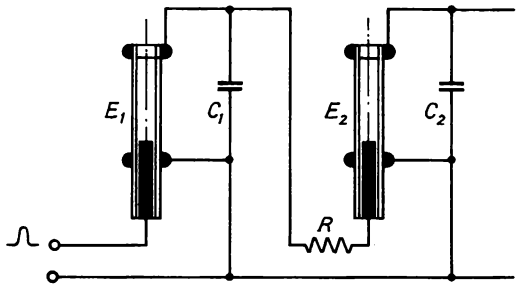


Fig. 43. - Générateur d'étincelles à étincelles glissantes.

ENREGISTREMENT DE MOUVEMENTS MÉCANIQUES RAPIDEMENT VARIABLES - STROBOSCOPIE

Le procédé stroboscopique, dont le principe est connu depuis plus d'un siècle, consiste à observer ou à photographier au ralenti un mouvement mécanique périodique très rapide.

Il suffit, pour arriver à ce résultat, de prendre une vue instantanée de l'organe en mouvement à une cadence légèrement différente de celle de son mouvement propre.

Si la période du mécanisme est T_1 , on produira des éclairs très lumineux à la période T_2 de manière que T_2 étant égal à T_1 $(1 + \varepsilon)$, le nombre des éclairs n nécessaires pour retrouver l'image initiale au bout d'une révolution complète du mécanisme soit tel que :

$$n\varepsilon T_1 = T_1 \qquad n = \frac{1}{\varepsilon}$$

Si les fréquences correspondantes sont f_1 et f_2 , la fréquence apparente du mécanisme stroboscopé sera $\varphi = f_1 - f_2$.

Pratiquement, le stroboscope devra donc pouvoir fournir des éclairs très intenses et très brefs à des intervalles de temps réglables suivant la fréquence du phénomène à étudier.

Le premier appareil réalisé, dans ce but, est le stroboscope GUILLET à corde vibrante et à lampe au néon. L'appareil se compose essentiellement d'une corde vibrante à mouvement entretenu électriquement dont la fréquence peut être accordée au rythme désiré en agissant sur un tambour tenseur gradué.

La corde vibrante est utilisée comme interrupteur dans le circuit primaire d'une bobine, sur le secondaire de laquelle se

trouve une lampe au néon. Le rythme des éclairs peut varier de 12 à 200 par seconde.

Un autre montage est réalisé dans le stroborama SEGUIN dans lequel l'éclairage intense et très bref d'un tube luminescent est obtenu par la décharge d'un condensateur commandée par une étincelle pilote (fig.44).

L'appareil comprend donc un système d'éclairage et synchroniseur qui détermine l'instant de l'éclairage sans être traversé par le courant d'éclairage. Le synchroniseur est constitué par un contacteur entraîné par un moteur à vitesse variable. A chaque contact, un condensateur de faible capacité (C_1 = 0,2 μ F environ) chargé par un générateur à courant continu se décharge dans le primaire d'un transformateur à H.F. sans fer T_{HF} comprenant peu de spires. La tension s'élève à la valeur nécessaire au passage du courant dans le tube à gaz raréfié. Cette décharge préalable ne sert qu'à amorcer la décharge principale d'un condensateur de forte capacité C plusieurs microfarads) chargé sous une tension de l'ordre de 8 à 10.000 V. Un éclateur E est placé en série avec le tube luminescent L dans le circuit de décharge du condensateur principal, mais ne fonctionne que lorsque le tube est excité par la décharge auxiliaire. La durée de l'éclair est de l'ordre du millionième de seconde et le contacteur qui détermine la fréquence des éclairs est commandé soit par un moteur indépendant à vitesse variable, soit directement par la machine en essai. Dans ce dernier cas, l'organe en mouvement paraît rigoureusement immobile dans une position que l'on peut d'ailleurs faire varier à volonté.

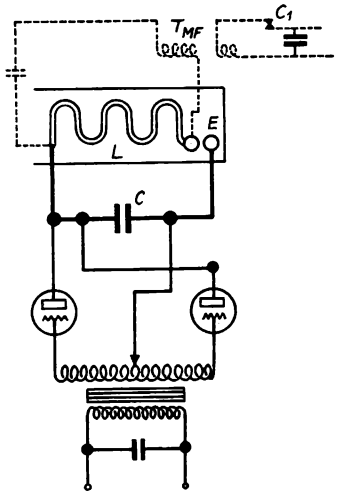


Fig. 44. - Stroborama Seguin.

Le tube luminescent est un tube au néon pour l'examen visuel. Il peut être avantageusement remplacé par un tube au xénon et au krypton pour l'enregistrement photographique. Si l'on veut obtenir des éclairs extrêmement brefs, il est nécessaire de ramener la valeur de la capacité du condensateur à quelques dixièmes de microfarad et d'augmenter sa tension de charge.

L'enregistrement photographique est rendu possible, soit en photographiant l'organe en mouvement pendant quelques dizaines d'éclairs sur la même plaque photographique (cas des projectiles, par exemple), soit en prenant une série de vues sur un film enroulé sur un tambour tournant à une vitesse suffisante pour que deux vues successives soient nettement séparées. Un calcul simple montre que, dans ce cas, il est indispensable de prendre des vues de petites dimensions, à l'aide d'un objectif très ouvert sur un film se déplaçant à une vitesse linéaire de l'ordre de 100 mètres par seconde.

ENREGISTREMENT A L'OSCILLOGRAPHE CATHODIQUE

Phénomènes transitoires. - Les enregistrements de phénomènes très rapides pouvant se traduire finalement par une courbe de tension électrique s'effectuent à l'oscillographe cathodique.

Nous n'insisterons pas sur cette méthode traitée en détail dans un chapitre spécial de cette publication.

Laissant donc de côté l'inscription des phénomènes périodiques, nous donnerons simplement quelques renseignements concernant celle des phénomènes transitoires très rapides.

Signalons d'abord que les oscillographes en verre, même alimentés sous des tensions de l'ordre de 5 à 6.000 V permettent difficilement l'enregistrement des phénomènes transitoires dont la durée est de l'ordre du millionième de seconde. En dessous de cette durée et même, pratiquement en dessous du cent millième de seconde, l'enregistrement de ces phénomènes s'effectue à l'aide d'un oscillographe cathodique démontable dans lequel la plaque photographique, placée dans le vide, est directement soumise au faisceau d'électrons.

Le phénomène transitoire à enregistrer nécessite un seul passage du faisceau électronique sur la plaque, pendant lequel doit s'inscrire la variation rapide de tension.

On peut envisager deux cas :

1° Le phénomène intéressant peut être commandé à volonté ; on peut donc déclencher le balayage, puis le phénomène après un très court intervalle de temps;

2° Le phénomène est imprévisible : c'est donc son apparition qui doit commander le balayage et son inscription se produit automatiquement après un très faible retardement provoqué sans déformation.

Dans le cas d'inscription commandée, le décalage entre le début du balayage et celui d'apparition du phénomène peut être de l'ordre de quelques microsecondes.

Il est obtenu, soit par des dispositifs mécaniques (secteurs tournants à grande vitesse et contacts très précis constitués par des petits balais plats en forme de peignes métalliques en bronze au glucinium, par exemple) ou par deux déclencheurs purement électroniques ou ioniques se commandant en cascade avec la constante de temps voulu (emploi de thyratrons).

Dans le cas d'inscription imprévisible, c'est le phénomène lui-même qui déclenche le balayage du faisceau cathodique.

Le tube cathodique est excité en permanence, mais le faisceau d'électrons est dévié en dehors d'un bord de la plaque photographique et arrêté par un cache évitant tout voile de la plaque pendant la période d'attente.

Cette déviation initiale peut s'obtenir sous l'effet combiné d'un champ magnétique constant ayant pour effet de dévier le faisceau en dehors de la plaque, mais vers le bord opposé à celui

de départ (retour au zéro) et d'un champ électrique provoquant en sens inverse la déviation d'attente. Ce champ électrique est créé par la tension d'un condensateur dont la décharge provoque le balayage à travers la plaque.

Le schéma figure 45 explique le fonctionnement du dispositif électrique d'enregistrement automatique.

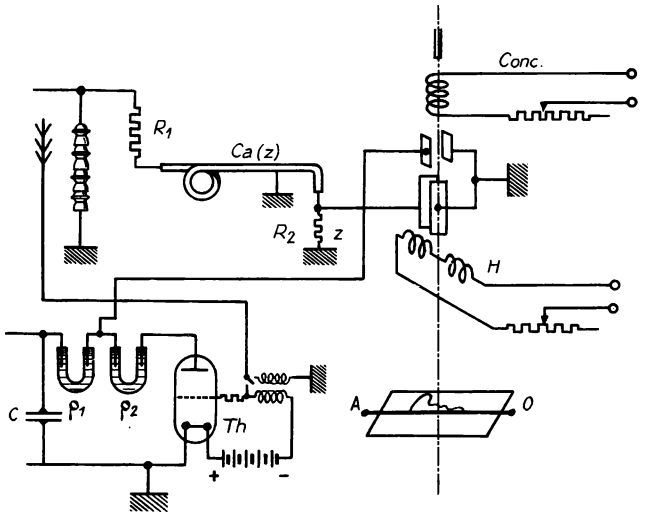


Fig. 45. - Schéma électrique d'enregistrement à l'oscillographe cathodique d'un phénomène transitoire très rapide : A. position d'attente du faisceau électrique (champ magnétique + champ électrique). O. Position donnée au faisceau par le champ électrique seul. Ca câble retardateur.

Câble retardateur - Supposons que le phénomène transitoire soit une onde de choc sous haute tension.

Le déclenchement du balayage est provoqué par la décharge d'un condensateur commandée par un thyratron dont la grille primitivement très fortement négative est portée brusquement à un potentiel positif à l'aide du collecteur de choc. L'excitation de la grille de contrôle est obtenue soit directement, soit par l'intermédiaire d'un transformateur Tesla de manière à tenir compte de la polarité initiale.

D'autre part, le phénomène doit s'inscrire pendant la durée du balayage quelques micro-secondes après son déclenchement. Dans ce but, la haute tension est appliquée sur les plateaux de déviation de l'oscillographe par l'intermédiaire d'un diviseur de tension constitué par des résistances-capacités en parallèle ou en série (s'il existe une tension continue ne pouvant débiter en permanence) et dont les constantes de temps doivent se conserver. Mais, dans le cas d'ondes de choc appliquées isolément, on utilise plus simplement un diviseur de tension à résistances pures R_1 et R_2. Dans un cas comme dans l'autre, les deux sections du diviseur sont réunies par un câble C_1 de longueur déterminée suivant le retard désiré. De plus, pour éviter toute déformation

de l'onde, il est nécessaire de donner à la résistance R_2 une valeur égale à l'impédance $Z = \sqrt{L/C}$ du câble retardateur.

Pratiquement, on trouve des câbles à fort isolement de papier, par exemple, dont l'impédance est de l'ordre de 40 à 60 ohms, ce qui détermine la valeur de R_2, et pour lesquels la vitesse de propagation peut être de l'ordre de 200.000 Km/sec. Un retard de 1 micro-seconde conduit à une longueur de câble de 200 m.

Il faut enfin éviter de provoquer l'oscillation propre du petit circuit oscillant déterminé par les plateaux de déviation formant condensateur et les connexions (aussi courtes que possible) reliant ceux-ci aux deux extrémités de la résistance R_2 - ce qui s'obtient en plaçant en série des résistances pures de l'ordre de quelques centaines d'ohms.

Le câble retardateur peut être remplacé par une ligne artificielle composée de résistances et de capacités réparties en nombre suffisant et dont les valeurs déterminent l'impédance et le retard désiré. On peut à cet effet utiliser un montage électronique dont un schéma, à la fois simple et très souple (DEVAUX L.C.A.), comporte l'emploi d'un circuit RC branché dans le circuit plaque d'une lampe dont la grille est attaquée par un basculeur électronique, commandé lui-même par l'impulsion d'entrée. La chute de tension aux bornes du circuit RC a pour effet d'amorcer un thyratron par variation de la tension grille portée initialement à une valeur convenable. L'amplitude du retard obtenu est fonction des valeurs de R et de C (fig.46).

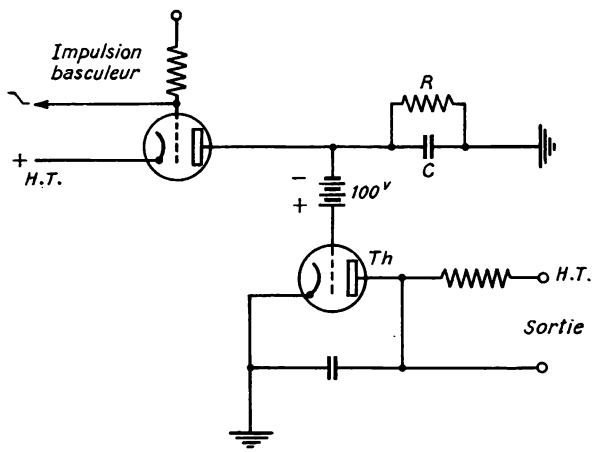


Fig. 46. - Schéma d'un montage de ligne à retard.

Dans l'ensemble du montage de déclenchement du balayage de l'oscillographe, les plus grosses difficultés à vaincre ne provenaient pas des circuits électriques, elles étaient dues à la nécessité de maintenir absolument constantes les caractéristiques de fonctionnement du tube cathodique qui, en raison de la finesse

nécessaire, est généralement du type à cathode froide et de l'obligation d'éviter tout voile sensible de la plaque photographique pendant la période d'attente qui peut durer plusieurs dizaines de minutes. Les améliorations techniques apportées aux nouveaux oscillographes cathodiques ont pratiquement permis d'éliminer complètement cet inconvénient.

NEUVIÈME CHAPITRE

RÉGULATION ET REDRESSEMENT DES TENSIONS ET COURANTS

par

M. DEMONTVIGNIER

Ingénieur E.P.C.I.
Ingénieur-Conseil à la Compagnie Électro-Mécanique

RÉGULATION ET REDRESSEMENT DES TENSIONS ET COURANTS

RÉGULATION DES TENSIONS 475
Introduction 475
Régulation d'une source locale 475
Régulation à partir d'un réseau de distribution 476
Montages régulateurs généraux 476
Montages régulateurs applicables aux tensions alternatives seules 481
Montages applicables aux tensions continues seules 491

RÉGULATION DES COURANTS 495
Résistances autorégulatrices 495

REDRESSEURS 498
Propriétés générales des redresseurs 498
Redresseur monophasé à une alternance 499
Redresseur monophasé à deux alternances 500
Redresseurs polyphasés 503
Redresseurs secs 503
Redresseurs à décharge électronique pure 507
Redresseurs à décharge ionique 510

FILTRAGE DES COURANTS REDRESSÉS 514
Harmoniques des tensions redressées 515
Principes et propriétés des filtres à courants redressés 516
Réalisation pratique des filtres 525
Exemples de filtres à courants redressés 530

NEUVIÈME CHAPITRE

RÉGULATION ET REDRESSEMENT DES TENSIONS ET COURANTS

RÉGULATION DES TENSIONS

INTRODUCTION

Le problème général de la régulation des tensions, c'est-à-dire de l'obtention de sources de tensions continues ou alternatives de valeur constante peut se présenter sous deux aspects : régulation d'un générateur local, ou régulation de la tension donnée par un réseau de distribution.

Le premier de ces problèmes ne se présente qu'assez rarement dans les laboratoires : il a d'ailleurs reçu depuis longtemps des solutions industrielles satisfaisantes, dont nous donnerons un aperçu. C'est le second problème qui se pose le plus fréquemment; comme nous le verrons, les solutions qu'on en a données sont encore assez incomplètes.

Dans tous les cas, la régulation peut être assurée, non seulement contre les variations provenant de la source d'énergie, mais aussi contre les variations de charge du circuit d'utilisation. Les dispositifs régulateurs peuvent être à commande manuelle ou automatique; dans le premier cas, on ne peut guère leur demander que la compensation des variations lentes; dans le second, on peut, au contraire, compenser des variations plus ou moins rapides.

RÉGULATION D'UNE SOURCE LOCALE

Les sources locales d'énergie électrique pouvant être utilisées dans les laboratoires sont constituées en général par un groupe de deux machines : un moteur, le plus souvent électrique, et une génératrice à courant continu, ou un alternateur. Dans ce dernier cas, il peut être nécessaire de régler sa fréquence, en agissant sur la vitesse du moteur; nous laisserons de côté ce problème spécial, pour nous occuper seulement de la régulation de tension; celle-ci se fait par insertion d'une résistance variable dans le circuit d'excitation de la génératrice ou de l'alternateur; pour des machines puissantes, il peut être nécessaire de passer par l'in-

termédiaire d'une dynamo excitatrice. Dans tous les cas, le réglage peut être manuel ou automatique.

Lorsqu'on cherche à compenser automatiquement des variations rapides, une difficulté se présente du fait de l'inductance élevée des circuits d'excitation, qui introduisent une constante de temps gênante. La solution adoptée généralement consiste à provoquer aussitôt après la variation brusque en question, une hyper-excitation temporaire, suivie d'un retour à l'excitation normale.

Parmi les régulateurs automatiques permettant d'atteindre ce but, on peut citer le régulateur à action rapide Brown Boveri, qui permet de régler facilement une tension à ± 1% près en quelques dixièmes de secondes, mais dont la description sortirait du cadre du présent ouvrage.

RÉGULATION A PARTIR D'UN RÉSEAU DE DISTRIBUTION

C'est le problème qui se pose le plus généralement dans les laboratoires. Nous diviserons les montages régulateurs de tension en trois classes : ceux qui sont applicables aussi bien en courant continu qu'en alternatif; ceux applicables au courant alternatif seul, et enfin ceux applicables au courant continu seul.

MONTAGES RÉGULATEURS GÉNÉRAUX

Les montages généraux, applicables quelle que soit la nature du courant d'alimentation, sont fondés sur l'emploi de résistances additionnelles ou de potentiomètres. Ils présentent l'inconvénient de conduire à une consommation d'énergie importante.

Les schémas utilisés se ramènent à deux : résistance série (fig. 1) ou montage potentiométrique (fig. 2).

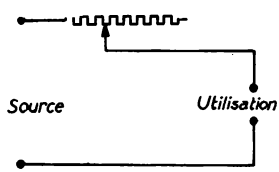


Fig. 1. - Régulation par résistance-série.

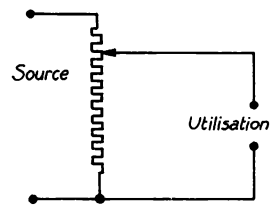


Fig. 2. - Régulation par montage potentiométrique.

L'intérêt du montage potentiométrique réside dans la possibilité de régler la tension même si l'intensité absorbée par le circuit d'utilisation prend de très faibles valeurs. Cet avantage est d'ailleurs acquis au prix d'une consommation supplémentaire d'énergie.

Dans ce qui va suivre, nous étudierons successivement les divers types de résistances et potentiomètres utilisables aux fins de régulation; nous donnerons ensuite les principes de leur commande automatique.

Résistances et potentiomètres métalliques. - Les résistances et potentiomètres métalliques sont généralement constitués en alliages dont la résistivité est affectée d'un faible coefficient de température, et pouvant résister à des températures élevées.

Les principaux alliages dont on peut faire usage sont les suivants :

Le maillechort, cupronickel dont la résistivité est de l'ordre de 30 à 50 microhms.cm. selon sa composition; les températures d'utilisation sont de l'ordre de 400°C. au maximum.

Le nickel-chrome, dont la résistivité est de l'ordre de 90 microhms.cm.; cet alliage existe en plusieurs nuances, résistant à des températures variant entre 600 et 1.200°C.

Il faut proscrire absolument l'emploi des ferro-nickels dont certains ont la fâcheuse propriété de recristalliser, devenant ainsi cassants après une certaine durée de fonctionnement à haute température.

Les résistances et potentiomètres métalliques peuvent être de deux types :

1° Résistances et potentiomètres à plots, dans lesquels le contact mobile se déplace sur des plots en métal bon conducteur, cuivre ou laiton, reliés à des prises sur les résistances. Le contact mobile est assuré par un balai, qui peut être constitué par une ou plusieurs lames métalliques flexibles, ou par un charbon. Ce balai peut toucher à la fois sans inconvénient deux ou plusieurs plots. Ces appareils sont d'une grande robustesse, mais ne conduisent à un réglage fin que s'ils sont munis d'un nombre de plots suffisant. Dans ce cas, l'encombrement est important.

2° Résistances et potentiomètres à spires jointives. - Ces appareils sont bobinés sur une carcasse isolante cylindrique; l'isolement entre spires est assuré, le plus souvent, avec les alliages du type nickel-chrome, par l'oxyde obtenu en laissant rougir le fil dans l'air avant bobinage. Le contact est assuré par un ou deux balais généralement formés de lames métalliques flexibles, et se déplaçant suivant des génératrices du cylindre. L'oxyde isolant doit évidemment être enlevé sur la face externe des spires, le long des génératrices de contact.

Ces appareils sont d'un emploi très fréquent, et donnent souvent lieu à des déboires; l'une des principales causes d'avaries réside dans le fait que la résistance d'isolement entre spires, due à l'oxyde, diminue notablement lorsque la température approche de celle du rouge sombre. Il en résulte un courant de fuite supplémentaire, contribuant à surcharger l'appareil s'il s'agit d'un potentiomètre, et pouvant, dans tous les cas, provoquer des échauffements locaux.

Il convient donc d'être très prudent dans l'usage de résistances et potentiomètres de ce type; cette prudence s'impose d'autant plus que les puissances dissipables indiquées par les constructeurs sont généralement surestimées.

Lors de l'achat de ces appareils, il convient donc de prendre soi-même un bon coefficient de sécurité sur les puissances (20 à 30% en moins ne sont pas excessifs).

Résistances à piles de carbone. - Les résistances à piles de carbone sont formées d'empilages d'éléments en aggloméré graphitique, en forme de ménisques flexibles disposés alternativement dans l'un et l'autre sens. L'ensemble est soumis à une pression axiale variable, qui aplatit plus ou moins les ménisques, faisant ainsi varier la résistance entre extrémités. On peut ainsi obtenir facilement une variation continue de résistance dans un rapport de 1 à 5, avec une course de quelques millimètres.

Ce type de résistance est disponible sur le marché allemand, mais n'a pas été jusqu'ici construit en France.

Résistances liquides. - Une résistance liquide est constituée simplement par deux électrodes trempant dans un électrolyte. Sa variation est obtenue par modification, soit de la surface des électrodes, soit de leur distance.

Dans l'utilisation de ces appareils en courant continu, il se produit une électrolyse, accompagnée de dégagements gazeux, ou de dépôts solides aux électrodes.

La nature des uns et des autres varie avec les sels dont la solution dans l'eau constitue l'électrolyte. Parmi les sels en question, on doit prohiber ceux qui donnent lieu à un dégagement de gaz toxiques, tels que les chlorures, et préférer ceux qui produisent simplement le mélange hydrogène-oxygène. On devra, toutefois, se méfier des risques d'explosion et prévoir une ventilation efficace. Des perturbations peuvent résulter de dépôts calcaires à la cathode, lorsqu'on emploie l'eau de rivière ordinaire. Cet électrolyte n'est utilisable que pour constituer des résistances élevées (résistivité de l'ordre de 2.000 ohms/cm. à la température ordinaire). Lorsqu'on désire abaisser cette résistivité, on obtient de bons résultats avec des solutions de carbonate de sodium. Les résistances liquides employées en courant continu présentent une corrosion rapide de l'anode, même si cette dernière est constituée d'un matériau peu attaquable, tel que le graphite.

Dans l'utilisation en courant alternatif aux fréquences industrielles, les phénomènes d'électrolyse sont négligeables, au moins tant qu'on n'augmente pas exagérément les densités de courant.

L'inconvénient fondamental des résistances liquides est leur instabilité, qui résulte en particulier du grand abaissement de la résistivité des électrolytes sous l'influence de l'échauffement. Cet inconvénient ne peut être évité que si l'on dispose de moyens d'évacuation de chaleur suffisants pour stabiliser la température. Cette difficulté, jointe à celles résultant de la corrosion, rendent difficile l'emploi des résistances liquides à la résolution des problèmes de régulation, malgré leur avantage d'une variation continue.

Asservissement automatique des résistances. - Les dispositifs d'asservissement automatique des résistances, applicables à la régulation des tensions, peuvent utiliser des servo-moteurs faisant mouvoir les contacts.

Dans le cas de potentiomètres, ou de résistances à contacts ou à plots, ou peut commander ces servo-moteurs par un voltmètre à contacts, agissant par l'intermédiaire de relais polarisés, sur un jeu de contacteurs inversant la marche du servo-moteur, ou provoquant son arrêt. Des interrupteurs de fin de course complètent le dispositif.

Dans le cas d'un servo-moteur à courant continu, le freinage de celui-ci à l'arrêt est obtenu par la mise en court-circuit de l'induit à l'aide du contacteur-inverseur. Si on utilise un moteur à courant alternatif, le freinage doit être assuré par un électro-aimant spécial.

Les montages de ce genre donnent facilement une compensation à $\pm$ 1% près. Ils utilisent toutefois des appareils correspondant à un état déjà ancien de la technique, qu'on peut souvent remplacer par des organes plus modernes.

Ainsi, le voltmètre à contacts, appareil coûteux et peu sensible, peut être remplacé par un dispositif utilisant un "pont voltmétrique" : c'est un pont de Wheatstone dont deux branches sont constituées par des résistances suivant la loi d'Ohm, et les deux autres par des résistances qui ne suivent pas cette loi : on peut employer dans ce but des lampes d'éclairage à filament de tungstène, ou de carbone, des redresseurs secs, etc. Un tel dispositif n'est en équilibre que pour une tension déterminée, appliquée à une diagonale. Si l'on s'écarte, en plus ou en moins, de la valeur d'équilibre, la tension de l'autre diagonale inverse sa polarité ou se déphase d'une demi-période, selon que le pont est alimenté en courant continu ou alternatif.

Lorsqu'on étudie théoriquement les conditions de fonctionnement d'un pont voltmétrique, on trouve que pour des valeurs données des résistances, il existe une résistance de charge optima, pour laquelle la puissance débitée est maximum pour un déséquilibre donné; cette résistance a pour valeur :

$$\frac{2R}{1 + \frac{R}{\rho}} ,$$

R étant la résistance de chacune des branches qui suivent la loi d'Ohm,

ρ étant la résistance dynamique $\frac{du}{di}$ au point de fonctionnement de chacune des autres.

Lorsqu'on utilise, comme résistances non ohmiques, des lampes à atmosphère gazeuse, on trouve, en étudiant le "rendement" du pont, c'est-à-dire le rapport de la puissance optima débitée à la puissance consommée à l'équilibre par le pont, qu'il y a intérêt à faire travailler ces lampes sous une tension très inférieure à leur tension nominale. Dans ces conditions, ce rendement, proportionnel au carré du déséquilibre relatif, peut atteindre des valeurs de l'ordre de $0,03 \left(\frac{\Delta U}{U_0}\right)^2$, pour des lampes utilisées à 0,2 de leur tension nominale, ΔU étant le déséquilibre, U_0 la tension d'équilibre.

La figure 3 montre un premier exemple d'utilisation du pont voltmétrique en courant continu : la polarité de la tension à la sortie du pont, qui varie, comme nous l'avons vu, avec le sens du déséquilibre, est sélectionnée par deux redresseurs secs, et le courant qu'ils laissent passer alimente deux relais sensibles.

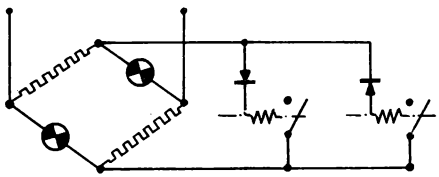


Fig. 3. - Utilisation d'un pont voltmétrique en courant continu.

La figure 4 montre un second exemple d'utilisation du pont voltmétrique en tension alternative : la tension à la sortie du pont, qui se déphase d'une demi-période au déséquilibre, est appliquée, après amplification non représentée sur la figure et d'ailleurs facultative, à un dispositif sélecteur de phase, formé de deux triodes ou pentodes, dont les tensions anodiques (ou de grille-écran) sont alternatives, l'une étant en phase, l'autre en opposition avec la tension d'alimentation du pont; ces tensions sont obtenues à l'aide d'un transformateur alimenté par cette dernière. Des relais sont insérés dans les circuits anodiques. On voit immédiatement que l'un ou l'autre fonctionne, selon qu'on se trouve au-dessus ou au-dessous de la tension d'équilibre du pont.

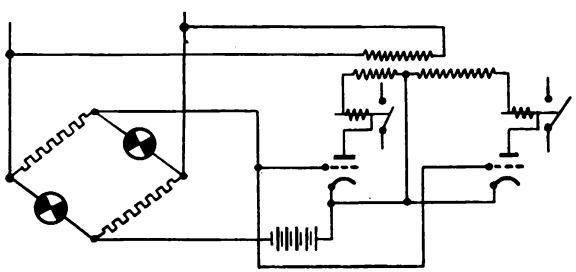


Fig. 4. - Utilisation d'un pont voltmétrique en courant alternatif.

La commande automatique des résistances à piles de carbone est plus facile à réaliser que celles des précédentes : la course nécessaire étant très faible, il y suffit d'un électro-aimant, dont on fait varier l'attraction soit en l'alimentant directement par la tension ou le courant à régler, soit en passant par un amplificateur de variations.

Il existe aussi sur le marché un dispositif permettant d'utiliser une commande par électro-aimants : c'est le régulateur à peigne. Celui-ci peut être appliqué à des résistances à grand nombre de plots (de 20 à 80); sur chacun de ces plots appuie une lame flexible en argent, appartenant à un peigne qui, au repos, met en court-circuit l'ensemble de la résistance. Une lame, faiblement oblique par rapport au peigne se déplace dans un plan perpendiculaire à celui de ce dernier, sous l'action d'un électro-aimant; la lame soulève graduellement les dents, mettant ainsi progressivement la résistance en circuit. Ce type de régulateur permet de commander des puissances de 6 W par plot.

MONTAGES RÉGULATEURS APPLICABLES AUX TENSIONS ALTERNATIVES SEULES

Parmi les organes pouvant être utilisés à la régulation des tensions alternatives, certains, comme les transformateurs et autotransformateurs à prises, nécessitent comme les résistances et potentiomètres, l'emploi d'une connexion mobile. D'autres, tels que les régulateurs d'induction, les inductances à noyau mobile et les transformateurs à fuites réglables, utilisent un circuit magnétique déformable.

Tous les organes précédents peuvent recevoir un asservissement mécanique, suivant les principes généraux décrits au paragraphe précédent.

Par contre, d'autres appareils, tels que les inductances à saturation, peuvent être asservis par des moyens purement électriques, et sont, à ce point de vue, très intéressants.

Nous étudierons successivement ces divers types d'appareils.

Transformateurs et autotransformateurs à prises. - Le principe de ces appareils est bien connu. Dans leur utilisation aux fins de régulation, on donne généralement la préférence aux autotransformateurs qui sont plus économiques et présentent des chutes de tension inductives et ohmiques plus réduites que les transformateurs à double enroulement; l'emploi de ceux-ci est à retenir lorsqu'on doit assurer, en même temps que la régulation, l'isolement du circuit alimenté par rapport au réseau.

Lorsqu'on se propose de compenser les variations d'une tension alternative provenant d'un secteur, il y a intérêt à déplacer la prise d'alimentation de l'autotransformateur, et non celle d'utilisation. Le circuit magnétique travaille alors à induction sensiblement constante.

Dans la réalisation des autotransformateurs de réglage, on retrouve les mêmes tendances que celles rencontrées dans les résistances. Ainsi, les prises de réglage peuvent être reliées aux plots d'un commutateur; cette méthode est employée lorsque la tension entre prises est trop élevée pour qu'on puisse admettre un court-circuit temporaire entre elles. Le commutateur peut alors être réalisé de deux manières : si l'on peut admettre des coupures temporaires lors du réglage, on sépare simplement deux plots actifs par un plot mort; cette solution est très imparfaite, et ne se rencontre que dans des appareils bon marché. Dans les appareils sérieux, on emploie deux balais : un balai principal, et un balai auxiliaire, relié au premier par une résistance pare-étincelles (fig. 5); dans ce cas, le balai auxiliaire doit être placé

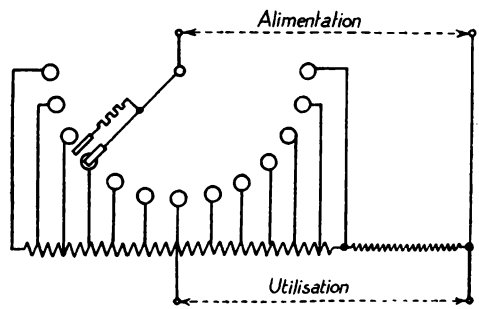


Fig. 5. - Schéma d'un autotransformateur de réglage, avec commutateur de prises.

du côté des tensions croissantes et la chute de tension provoquée par la résistance pare-étincelles sous la charge normale doit être de l'ordre de la tension entre plots.

Dans ce cas, le passage d'une prise à l'autre s'accompagne du minimum de perturbations.

Ces appareils ne permettent évidemment que des réglages assez grossiers à moins d'admettre un grand nombre de prises. L'avertissement automatique se fait selon les principes généraux énoncés plus haut; il faut toutefois prévoir en supplément un dispositif permettant l'arrêt exact du balai principal sur un plot actif, le balai auxiliaire restant entre plots.

Les appareils précédents sont analogues aux résistances à plots.

Il existe également l'équivalent des résistances à curseur sur spires jointives : on trouve en particulier sur le marché américain, et aussi maintenant sur le marché français, des autotransformateurs bobinés sur un circuit magnétique en forme de tore à section rectangulaire : les spires de réglage forment la dernière couche du bobinage; elles sont dénudées sur la surface externe cylindrique, et un balai solidaire d'un axe, coïncidant avec celui du tore, vient simplement frotter sur les spires. La tension entre celles-ci doit être suffisamment réduite pour que le court-circuit provoqué par le balai, lorsqu'il en réunit plusieurs, soit admissible. Ces appareils permettent un réglage très progressif et sont d'un asservissement automatique facile (pas de nécessité d'arrêt sur plot).

Les appareils du type précédent sont disponibles jusqu'à des puissances traversantes de 3 KVA environ en monophasé, avec réglage de la tension de sortie entre zéro et 130% de la tension d'entrée.

Pour des puissances plus élevées, il existe des appareils analogues réalisés sur des circuits magnétiques ordinaires, les curseurs sont alors à déplacement linéaire.

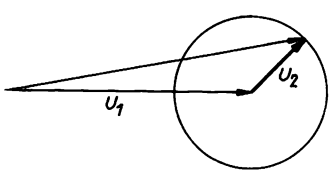


Fig. 6. - Diagramme vectoriel d'un régulateur d'induction.

Régulateurs d'induction.- Rappelons qu'un régulateur d'induction est formé d'un transformateur à champ tournant, bobiné sur un circuit magnétique analogue à celui d'un moteur asynchrone, avec cette différence que le rotor, au lieu de se trouver libre, est calé en une position variable. Dans ces conditions, l'enroulement du stator, alimenté par une source de tensions polyphasées, donne naissance à un champ tournant qui induit, dans l'enroulement rotorique, des tensions polyphasées décalées par rapport aux tensions primaires d'un angle variable avec la position du rotor. Si donc on met en série le rotor et le stator, leurs tensions U_1 et U_2 se composent vectoriellement (fig.6), et la tension aux bornes de l'ensemble peut varier d'une manière continue entre les valeurs $U_1 - U_2$ et $U_1 + U_2$. Il se produit en même temps d'ailleurs un

déphasage de la tension de départ sur la tension primaire, mais celui-ci n'est généralement pas gênant; il existe d'ailleurs des procédés permettant sa compensation.

Les régulateurs d'induction sont d'un asservissement très simple, absolument analogue à celui des résistances. Ils sont fréquemment employés à des usages industriels, et il y aurait intérêt à répandre leur emploi dans les laboratoires : là encore, il faudra stimuler les constructeurs, qui jusqu'ici ne s'intéressent guère à la construction d'appareils de petite puissance.

, Inductances à noyau mobile. - Les inductances à noyau mobile sont le plus souvent pourvues d'un noyau droit, qu'on enfonce plus ou moins dans le bobinage. On peut également utiliser un entrefer réglable sur un circuit magnétique. Dans tous les cas, les dispositifs de réglage mécanique de la position des parties mobiles doivent être irréversibles, ou affectés de frottements tels que les attractions magnétiques ne suffisent pas à provoquer le mouvement.

Il n'existe pas de formules théoriques satisfaisantes pour le calcul des inductances à noyau mobile. Le mieux est de partir de données expérimentales; on peut opérer comme suit : étant donné un circuit magnétique déformable déterminé, on le munit d'un bobinage quelconque, et on mesure simplement la tension efficace U entre ses bornes, en fonction du courant I qui le traverse, pour un état déterminé du circuit magnétique. Si les pertes sont faibles, on peut confondre sensiblement la puissance apparente U I avec la puissance réactive $\omega L I^2$. On trace alors la courbe de $\omega L I^2$ en fonction des ampères-tours n I. On voit facilement que cette courbe est invariante pour tous les bobinages de même volume, quel qu'en soit le nombre de spires; l'expérience montre, en outre, que le volume du bobinage n'a qu'une influence secondaire. Il est alors facile, étant donné un bobinage quelconque sur le même circuit magnétique, d'en déduire les caractéristiques à partir de la famille de courbes précédente.

On peut de même passer facilement à celles des bobinages placés sur des circuits magnétiques géométriquement semblables : en effet, il suffit, pour obtenir les familles de courbes correspondantes, de multiplier les ampères tours par le rapport de similitude linéaire, et les puissances réactives par le cube de ce rapport.

Les inductances à noyau mobile peuvent être utilisées à la manière des résistances série dans les montages généraux étudiés plus haut. Leur calcul s'effectue très simplement en utilisant la méthode de séparation des puissances de Boucherot.

Transformateurs à fuites réglables. - Ces appareils sont, au fond, la combinaison d'un transformateur et d'une inductance à noyau mobile, équivalente aux fuites magnétiques entre primaire et secondaire. La figure 7 montre une forme de réalisation possible d'un tel appareil, applicable à un transformateur monophasé du type cuirassé; comme on le voit, les fuites sont données par deux paquets de tôles T qu'on peut enfoncer plus ou moins entre l'enroulement primaire P et l'enroulement secondaire S. Ce type d'appareil, de même que les inductances variables connectées en

série dont il est l'équivalent, n'est guère applicable qu'à la régulation de faible amplitude sur des circuits à charge peu variable. Il se prête assez mal, d'ailleurs, à un asservissement mécanique.

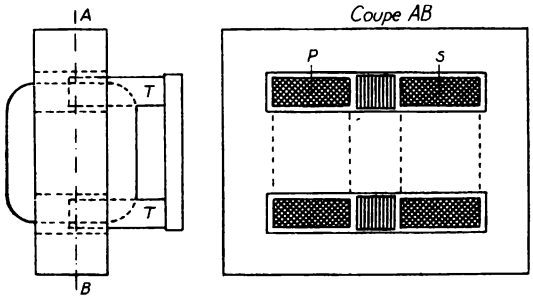


Fig. 7. - Réalisation possible d'un transformateur a fuites réglables.

Inductances à saturation par flux continu. - Ces appareils sont fondés sur la propriété suivante des cycles d'hystérésis des matériaux ferromagnétiques :

Si nous considérons dans le plan des B, H la courbe de première aimantation, représentée en trait plein, d'une telle substance, par exemple l'acier au silicium, on voit immédiatement que, pour un cycle d'hystérésis symétrique, correspondant à l'utilisation ordinaire de la tôle, représenté en pointillé, la perméabilité instantanée $\frac{d\,B}{d\,H}$ a pendant la plus grande partie du cycle, une valeur voisine de la pente maximum de la courbe de première aimantation.

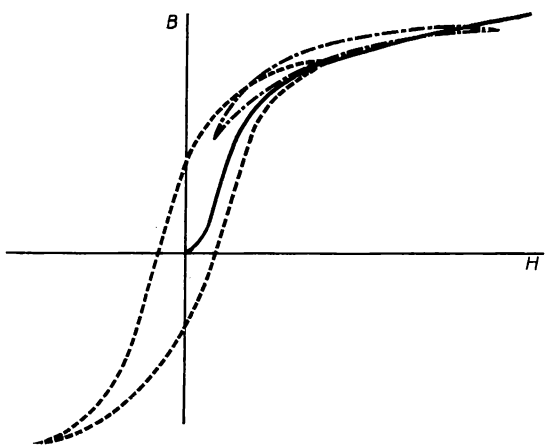


Fig. 8. - Courbe de première aimantation et cycles d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique.

La substance présente, dans ce cas, une perméabilité apparente très grande au flux alternatif. Si l'on trace, au contraire, un cycle d'hystérésis dissymétrique, par exemple en superposant dans la substance un champ magnétique continu au champ alternatif, on

obtient un cycle présentant l'aspect de celui en trait mixte. On voit que ce cycle montre sur sa plus grande partie des valeurs de $\frac{dB}{dH}$ voisines de la pente de la courbe de première aimantation, dans la partie saturée de celle-ci. La substance présente, dans ce cas, une perméabilité apparente très faible au flux alternatif. En fait, cette perméabilité peut descendre à un chiffre compris entre 100 et 200, contre 3000 en alternatif pur.

On dispose donc d'un procédé extrêmement énergique pour faire varier la réluctance d'un circuit magnétique au flux alternatif, c'est-à-dire l'inductance d'un bobinage placé sur ce circuit; il suffit d'y faire naître un flux auxiliaire continu, à l'aide d'un bobinage supplémentaire de saturation.

Dans l'utilisation pratique de ce principe, on s'arrange pour réduire au minimum l'induction mutuelle entre les bobinages principaux et les bobinages de saturation. La figure 9 montre deux manières de procéder :

Dans la variante a), on emploie un circuit magnétique unique à trois noyaux. Les bobinages inductifs sont disposés, par exemple, sur les noyaux extrêmes, et l'inductance variable est constituée en les mettant en série dans le sens indiqué sur la figure. On voit aisément que, dans ces conditions, ils n'induisent aucun flux dans le noyau médian. C'est sur celui-ci qu'est enroulé le bobinage de saturation. La disposition inverse est également possible. Dans la variante b), on utilise deux circuits magnétiques simples avec chacun un bobinage inductif et un bobinage de saturation. Les sens de couplage sont inversés, de sorte que, là encore, il n'y a pas d'induction mutuelle, au moins en l'absence de courant de saturation.

Lorsqu'on établit ce dernier, on voit que les circuits magnétiques se trouvent le siège à la fois d'un flux continu et d'un flux alternatif; leur perméabilité apparente diminue, et il en est de même de l'impédance des bobinages inductifs, dont l'inductance peut facilement devenir négligeable devant la résistance.

Une analyse plus poussée des phénomènes montre qu'il y a, en réalité, induction, dans le circuit de saturation, d'une tension à fréquence double de la fréquence du réseau d'alimentation. Le courant qui en résulte a, le plus souvent, une influence négligeable.

Il va sans dire que rien n'empêche d'utiliser simultanément plusieurs enroulements de saturation : on pourra alors faire varier l'inductance d'un bobinage en fonction de plusieurs variables.

Les montages de la figure 9 se généralisent facilement en polyphasé : ainsi, en triphasé, on peut faire usage d'un circuit magnétique à 4 noyaux ou de 3 circuits magnétiques simples. Dans ce cas, il y a induction, dans les bobinages à saturation, d'une tension à fréquence triple de la fréquence fondamentale.

Il est à noter que l'impédance des bobinages inductifs suit avec un retard négligeable (inférieur à 10^{-3} sec) les variations du courant de saturation, de sorte que la rapidité de réponse du système n'est limitée que par la constante de temps du circuit parcouru par ce courant.

Le calcul théorique des inductances à saturation est impraticable; là encore, le mieux est de partir de données expérimentales convenablement systématisées. Nous avons adopté la représentation suivante pour un matériau magnétique déterminé : on trace, en coordonnées logarithmiques, la courbe de la puissance réactive par unité de masse en fonction des ampères tours alternatifs par unité de longueur du circuit magnétique, le champ de saturation étant maintenu à une valeur fixe, correspondant à un certain nombre d'ampères tours continus par centimètre. On obtient ainsi une famille de courbes pour les inductances sans entrefer, dont on peut déduire les familles correspondant aux inductances dont l'entrefer forme une certaine fraction de la ligne de force moyenne du circuit magnétique.

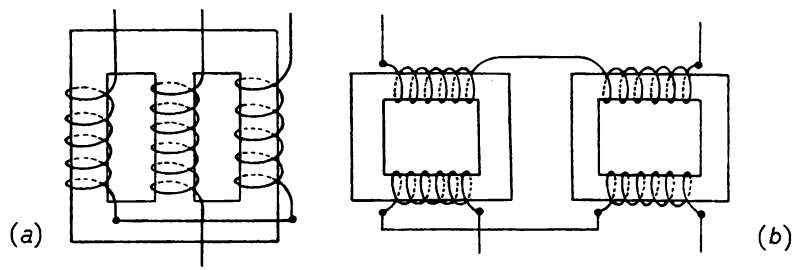


Fig. 9. - Réalisations pratiques d'inductances monophasées à saturation.

Les inductances à entrefer permettent de loger une plus grande puissance réactive sur le circuit magnétique; celles sans entrefer nécessitent une puissance de saturation plus grande, et leur sensibilité à l'asservissement est plus faible. Aussi a-t-on généralement intérêt à utiliser, pour les problèmes de régulation, des inductances sans entrefer.

La figure 10 représente un abaque de calcul très commode pour les inductances sans entrefer dont le circuit magnétique est formé de tôles d'acier au silicium à 2% (tôles dites de 1 w 6 par kg). On voit que les diverses courbes des VAR par kg en fonction des ampères tours alternatifs $\frac{n\,I}{l}$ par cm, relatives aux diverses valeurs des $\frac{n\,J}{l}$ (ampères tours de saturation par cm) sont asymptotes pour les grandes valeurs de $\frac{n\,I}{l}$ à la courbe relative au fonctionnement en alternatif pur $\frac{n\,J}{l} = o$. On a représenté également sur l'abaque, sous forme d'une courbe hachurée, la limite supérieure du domaine d'utilisation conduisant à un échauffement admissible pour le circuit magnétique non refroidi par des artifices spéciaux. Cette limite correspond à une dissipation de 2 watts par kilogramme de tôles.

Le mode d'emploi de l'abaque (fig. 10) est le suivant : en général, quand on établit le projet d'une inductance à saturation, on se donne les valeurs que doit prendre celle-ci pour deux valeurs déterminées I_1 et I_2 du courant alternatif qui la traverse. On en déduit les puissances réactives correspondantes $\pi_1 = \omega L_1 I_1^2$ et $\pi_2 = \omega L_2 I_2^2$. On construit alors une grille en papier calque (fig.

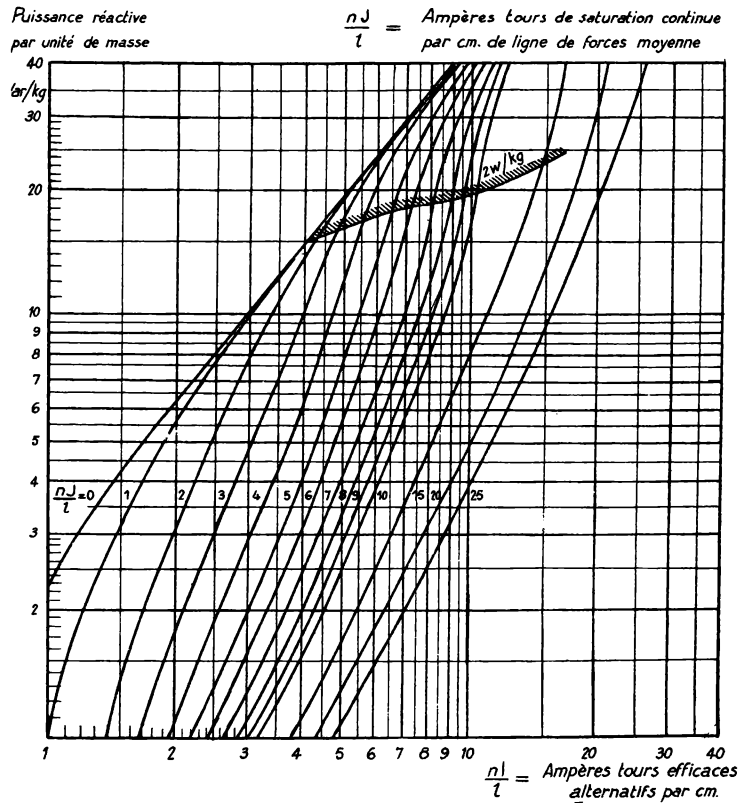


Fig. 10. - Abaque pour le calcul des inductances à saturation sans entrefer (Acier au Silicium à 2%).

11), en coordonnées logarithmiques à la même échelle que l'abaque de la figure 10, entre les points de coordonnées (I_1, π_1) (I_2, π_2). Du fait de l'emploi des coordonnées logarithmiques, les dimensions du rectangle ainsi obtenu ne dépendent que des rapports $\frac{I_2}{I_1}$ et $\frac{\pi_2}{\pi_1}$.

Il suffit alors de placer la grille de la figure 11 sur l'abaque de la figure 10, les côtés du rectangle étant parallèles aux axes de coordonnées, les deux points (I_1, π_1) (I_2, π_2) tombant dans les limites du domaine d'utilisation défini plus haut, et de manière que les ampères-tours de saturation soient aussi petits que possible.

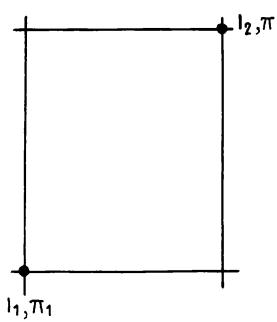


Fig. 11. - Grille pour l'emploi de l'abaque de la figure 10.

La place de la grille étant fixée, on en déduit immédiatement les valeurs des VAR/kg et des $\frac{nI}{l}$ relatifs aux points (I_1, π_1) (I_2, π_2). Le quotient $\frac{\pi_1}{\text{VAR/kg}}$ donne immédiatement le poids de tôle à employer, la ligne de forces moyenne l du circuit magné-

tique étant donnée, le quotient $\frac{\frac{nI_1}{l} \times 1}{I_1}$ donne immédiatement le nombre de tours du bobinage à courant alternatif. Enfin, on avait pris soin de noter aussi les rapports $\frac{nJ}{l}$ relatifs aux deux points extrêmes de fonctionnement on en déduit immédiatement les ampères tours de saturation correspondants.

La méthode de calcul précédente est extrêmement rapide, et fournit des résultats suffisamment approchés; dans la réalisation pratique des appareils, il est toutefois bon de prévoir des prises sur les bobinages, afin de permettre un ajustement exact.

Ceci posé, les inductances à saturation par courant continu peuvent remplir dans les problèmes de régulation des tensions alternatives les rôles suivants :

1° Inductance série. - Comme l'indique la figure 12, les enroulements inductifs sont insérés entre les bornes d'alimentation et celles d'utilisation; les enroulements de saturation sont alors parcourus par un courant continu auxiliaire, dont les variations sont réglées par un dispositif convenable. Celui-ci pourrait être, par exemple, une résistance commandée manuellement, ou par un régulateur à action rapide dont le fonctionnement permet de compenser en grande partie la constante de temps des bobinages de saturation. On peut faire également usage d'un amplificateur électronique, à l'entrée duquel on applique, par exemple, la tension issue d'un pont voltmétrique. Dans ce cas, le dernier étage d'amplification, débitant directement dans les bobinages de saturation, gagnera à présenter une résistance anodique élevée car on donnera ainsi à l'ensemble du circuit de saturation une faible constante de temps.

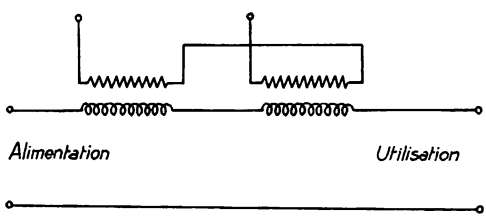


Fig. 12. - Emploi d'une inductance série à saturation.

2° Amplificateurs à saturation magnétique. - Si, dans un problème de régulation, on peut admettre une constante de temps qui ne soit pas très petite, il est possible de remplacer partiellement ou totalement les amplificateurs électroniques par des amplificateurs à saturation magnétique, qui utilisent précisément des inductances à saturation, dans le but d'amplifier un courant continu.

La figure 13 représente le schéma d'un étage d'amplificateur à saturation magnétique. Il se compose d'une inductance à saturation représentée ici sous la forme à trois noyaux et d'un redresseur sec, à oxyde de cuivre ou au sélénium, monté en pont.

Les bobinages inductifs de l'inductance à saturation sont connectés en série avec les bornes alternatives du redresseur sec, et l'ensemble est alimenté par une source auxiliaire de tension alternative A. Le courant continu à amplifier est injecté dans le bobinage de saturation par les bornes d'entrée E. On recueille à la sortie S le courant continu amplifié.

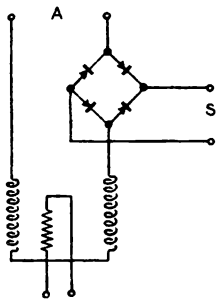


Fig. 13. - Schéma d'un étage d'amplificateur à saturation magnétique.

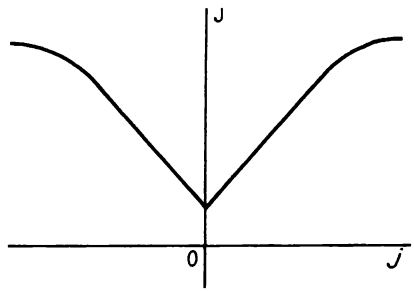


Fig. 14. - Caractéristique d'un étage d'amplificateur à courant continu à saturation magnétique.

La figure 14 montre la caractéristique d'un tel étage d'amplification : le courant de sortie J est évidemment de sens invariable, alors que le courant d'entrée j ne l'est pas, et la courbe présente deux branches symétriques par rapport à l'axe des J. Dans l'utilisation pratique de ce montage, on s'arrange, en général, pour travailler sur une portion rectiligne d'une des branches. Il existe des artifices permettant d'éliminer l'ordonnée à l'origine qui provient du courant magnétisant de l'inductance en l'absence de saturation continue.

Ce courant magnétisant peut être réduit à une valeur négligeable si l'on constitue les circuits magnétiques par du mumétal, alliage à haute perméabilité à 70 % de nickel. L'amplificateur présente alors, en outre, la précieuse propriété d'avoir une réponse sensiblement indépendante de la tension alternative auxiliaire donnée par les bornes A, alors qu'avec l'acier au silicium, la pente des caractéristiques est à peu près proportionnelle à cette tension.

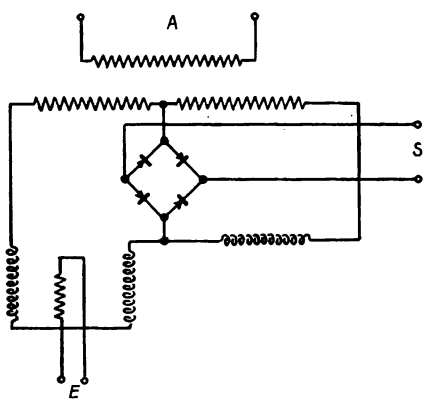


Fig. 15. - Amplificateur à saturation magnétique, avec compensation de l'ordonnée à l'origine.

Un autre procédé pour éliminer l'ordonnée à l'origine, et obtenir la proportionnalité entre les courants j et J, consiste à utiliser le montage de la figure 15, dans lequel l'inductance à saturation constitue une branche d'un pont de Wheatstone, dont les

trois autres branches sont formées d'une inductance fixe et des deux moitiés du secondaire d'un transformateur, dont le primaire est alimenté par la source de tension alternative A. Le montage est applicable aux circuits magnétiques en acier au silicium.

Il est facile d'obtenir, avec les amplificateurs à saturation magnétique, des rapports entre la puissance à la sortie et la puissance à l'entrée de l'ordre de 70, sans sortir de la région linéaire de la caractéristique.

Les amplificateurs à saturation magnétique introduisent évidemment, à chaque étage, les constantes de temps de leurs bobinages, qui atteignent facilement quelques dixièmes de seconde. Ils ne sont donc pas utilisables lorsqu'on recherche des réponses très rapides, mais leur emploi peut être précieux dans beaucoup de problèmes de régulation.

Inductances à saturation par flux alternatif. - Les inductances saturées par un flux alternatif peuvent également être utilisées à la constitution de montages régulateurs de tension. J'en donnerai ici un exemple, qui m'a permis autrefois de réaliser des régulateurs très efficaces contre les variations de tension d'alimentation.

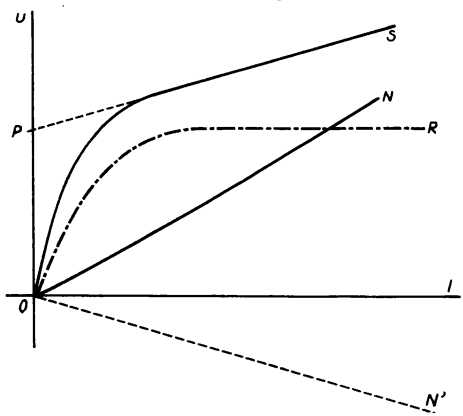


Fig. 16. - Fonctionnement d'un régulateur à saturation alternative.

Considérons deux inductances à noyau ferromagnétique, parcourues par le même courant alternatif (il suffit, pour l'obtenir, de les monter en série). Supposons que l'une de ces inductances se sature beaucoup plus vite que l'autre; dans ces conditions, les courbes donnant, pour chacune d'elles, la tension efficace V aux bornes en fonction du courant efficace I qui la traverse sont respectivement les courbes S pour l'inductance saturée et N pour l'inductance non saturée, représentées sur la figure 16; la courbe N est entièrement rectiligne, la courbe S présente deux parties sensiblement droites; celle qui nous intéresse correspond à la région saturée; prolongeons-là jusqu'en P, à la rencontre de l'axe des U. Munissons l'inductance non saturée N (fig. 17) d'un bobinage supplémentaire N'; la tension aux bornes de cet enroulement varie linéairement en fonction du courant I, et la pente de la courbe de variation est proportionnelle au nombre de spires. Choisissons cette pente égale à celle de la droite PS, et connectons l'enroulement N' en série avec l'enroulement S, mais en sens inverse de l'enroulement N. Dans ces conditions, on recueillera aux bor-

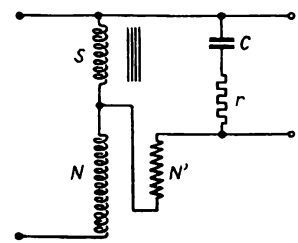


Fig. 17. - Régulateur à saturation par flux alternatif.

nes de l'ensemble de l'inductance S et du bobinage N' une tension qui sera la différence entre la tension à leurs bornes. La variation de la tension résultante sera donc donnée par le courbe R, en trait mixte sur la figure 16. On voit qu'elle présente une région dans laquelle la tension est constante.

Le raisonnement précédent n'est nullement rigoureux, car il suppose que les tensions et courants sont sinusoïdaux, et en quadrature, ce qui est faux. En fait, quand on réalise le montage de la figure 20, on n'obtient pas de bon résultat, mais l'expérience montre que, pour obtenir une régulation satisfaisante, il suffit de connecter à la sortie un condensateur C, de capacité convenable, en série avec une résistance r.

Le réglage de ces deux éléments influe beaucoup sur le fonctionnement du système, en particulier sur la forme de la tension à la sortie. Celle-ci, d'ailleurs, est fort loin d'être sinusoïdale; elle renferme en particulier un harmonique 3 important.

Lorsque la tension d'entrée varie, la tension à la sortie change de forme, mais il est possible, en réglant C et r, d'obtenir que sa valeur efficace reste constante. On peut également obtenir que la valeur moyenne de la tension donnée par un redresseur alimenté par la tension de sortie reste constante. Il est facile d'obtenir une régulation à $\pm 1\%$ contre des variations de tension d'entrée de $\pm 15\%$, on peut même parfois obtenir une hyperrégulation : la tension de sortie varie faiblement, en sens inverse de la tension d'entrée.

On peut faire en sorte que la variation de tension à la sortie du dispositif en fonction de la charge reste également très faible. Par contre, si la fréquence d'alimentation varie, la tension de sortie présente une variation du même ordre.

On peut obtenir de meilleurs résultats en ce qui concerne la forme de courbe et l'insensibilité à la fréquence, mais les montages sont plus complexes que le précédent.

MONTAGES APPLICABLES AUX TENSIONS CONTINUES SEULES

Emploi des tubes stabilisateurs à décharge luminescente. - Un procédé très employé de stabilisation des tensions continues est fondé sur l'emploi des tube stabilisateurs à décharge luminescente.

Les tubes stabilisateurs en question renferment deux ou plusieurs électrodes plongées dans une atmosphère de gaz

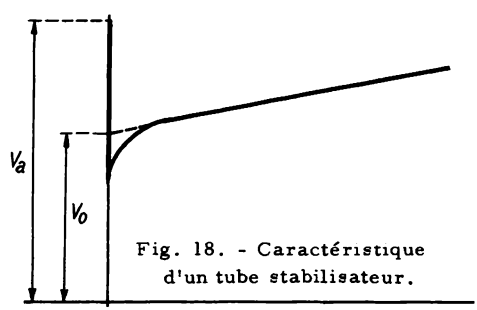


Fig. 18. - Caractéristique d'un tube stabilisateur.

rare, sous des pressions de quelques centimètres de mercure. La décharge qui s'y établit doit être du type autonome, et la gaine négative ne doit pas recouvrir la totalité de l'électrode; dans ces conditions, la surface recouverte par cette gaine varie à peu près proportionnellement au débit, mais la tension aux bornes du tube varie assez peu en fonction de ce dernier. En fait, la caractéristique d'un tel tube stabilisateur présente l'aspect de la figure 18 : l'amorçage de la décharge se fait pour une tension V_a, et s'accompagne d'un brusque abaissement de cette tension. Lorsqu'on augmente le débit, celle-ci s'élève d'abord rapidement, puis atteint une partie sensiblement rectiligne, pour laquelle on peut admettre l'équation :

$$V = V_0 + \rho j ,$$

j courant débité par le tube, ρ résistance interne de ce dernier.

La valeur de l'ordonnée à l'origine V_0 varie avec la nature du gaz employé et des électrodes. Elle peut s'abaisser jusqu'à une cinquantaine de volts, par l'emploi d'un mélange néon-argon, et d'électrodes de nickel recouvertes de potassium.

Dans les types les plus répandus (tube Stabilovolt) la tension V_0 est de l'ordre de 70 volts; le gaz est un mélange néon-argon, les électrodes sont en fer recouvert de baryum.

Il existe des modèles pour des tensions plus élevées, jusqu'à 250 volts (atmosphère d'argon). Les courants maxima admissibles dans ces tubes sont de l'ordre de la centaine de milliampères.

La tension d'amorçage surpasse en général la tension V_0 de quelques dizaines de volts.

Quant à la résistance interne ρ, elle peut s'abaisser à quelques dizaines d'ohms seulement. Nous verrons ci-après qu'elle doit être aussi faible que possible. On a d'ailleurs des difficultés à obtenir des valeurs égales pour les tubes d'une même fabrication; des variations du simple au double, et même davantage, ne sont pas rares, et l'on doit toujours procéder à une sélection sévère.

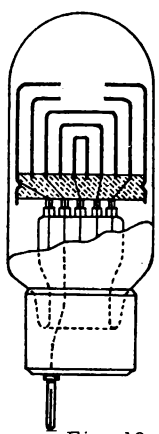
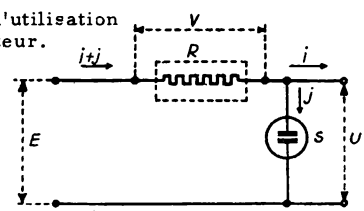


Fig. 19. - Réalisation pratique d'un tube stabilovolt.

Il est possible de réunir en série dans une même enveloppe plusieurs tubes stabilisateurs; c'est ce qui réalise la construction du tube Stabilovolt le plus courant, qui renferme 4 étages à 70 volts, permettant la régulation d'une tension totale de 280 volts environ. Les électrodes sont formées de cloches concentriques, montées sur une base isolante (fig. 19) et reliées par des fils passant à l'intérieur d'étuis isolants à un culot à 5 broches.

Fig. 20. - Montage d'utilisation d'un tube stabilisateur.



Dans l'utilisation pratique la plus courante des tubes stabilisateurs, on emploie le montage de la figure 20, sur lequel E désigne la tension de la source continue à régler, U la tension réglée, S le tube stabilisateur; R est en général une résistance autorégulatrice, telle qu'une résistance fer-hydrogène; cet appareil, que nous étudions au paragraphe suivant, possède la propriété d'être traversé par un courant peu variable en fonction de sa tension aux bornes. La courbe de variation de la tension V en question, en fonction du courant i + j traversant la résistance autorégulatrice, présente l'aspect de figure 21.

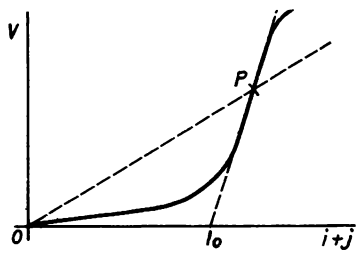


Fig. 21. - Caractéristique d'une résistance autorégulatrice.

On peut admettre, pour la région de faible variation du courant, l'équation :

$$i + j = I_0 + \frac{V}{R_s}$$

D'autre part, on a :

$$E = U + V .$$

Eliminant les variables j et V entre les trois équations précédentes, nous obtenons :

$$E = U\left(1 + \frac{R_s}{\rho}\right) + R_s i - \left(\frac{R_s}{\rho} U_0 + I_0\right)$$

Cette équation nous permet d'étudier la régulation vis-à-vis des variations du réseau et vis-à-vis du débit.

Supposons qu'une variation du réseau d'alimentation entraîne une variation ΔE de la source de tension continue. Il en résultera une variation ΔU de la tension de sortie donnée par

$$1 + \frac{R}{\rho}$$

la variation de tension est donc divisée par $1 + \frac{R}{\rho}$.

Supposons maintenant que, le réseau étant à tension constante, on ait une variation de débit Δi; il en résultera une variation de tension

$$\Delta U = -\frac{R_s}{1 + \frac{R_s}{\rho}} \Delta i = -\frac{R_s \rho}{R_s + \rho} \Delta i .$$

La variation de tension est égale à la chute que donnerait le courant Δi dans l'ensemble des résistances R_s et ρ montées en parallèle.

Par l'emploi d'une bonne résistance autorégulatrice et d'un tube stabilisateur sélectionné, on peut arriver à réduire les variations d'un réseau de $\pm 10\%$ à $\pm 0,1\%$. Les formules précédentes montrent que ceci implique un rapport $\frac{R}{\rho}$ de l'ordre de 100; si le tube présente une résistance intérieure de 30 ohms, la

résistance autorégulatrice R doit avoir une valeur d'au moins 3000 ohms.

Les variations de charge produisent alors des variations de tension données sensiblement par la résistance du tube.

Ces montages stabilisateurs s'accompagnent toujours d'une perte d'énergie importante; en effet, la présence de la résistance autorégulatrice et la nécessité de surmonter la tension d'amorçage du tube obligent à choisir une tension E supérieure de 50% au moins à la tension réglée. De plus, l'appareil fonctionne presque à charge continue constante, quelle que soit celle d'utilisation.

Lorsqu'on utilise des tubes à étages multiples, du genre de celui de la fig. 19, il est préférable, pour diminuer l'influence des tensions d'amorçage, de réunir, par des résistances de quelques centaines de milliers d'ohms, les électrodes intermédiaires à celle de tension maximum. Dans ces conditions, la surtension d'amorçage de l'ensemble, s'abaisse à celle d'un seul étage, soit une cinquantaine de volts.

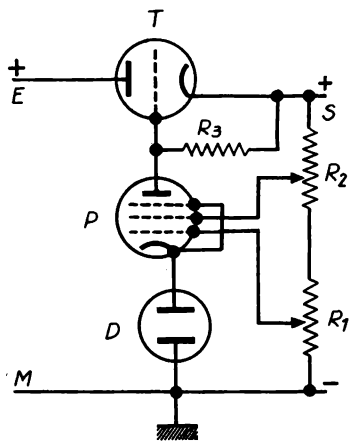


Fig. 22. - Emploi d'un tube électronique série

Lorsqu'on désire une stabilisation très exacte, on peut utiliser en cascade deux montages du type de la figure 20; on obtient ainsi une tension très constante, au prix d'une consommation élevée d'énergie.

Précisons pour terminer qu'il est possible d'utiliser des tubes stabilisateurs en série, alors que leur montage en parallèle est généralement impossible Enfin, la stabilisation n'est vraiment obtenue qu'après un certain temps d'établissement (quelques minutes), provenant en particulier de la mise en équilibre thermique des tubes, et aussi des résistances autorégulatrices.

Emploi d'un tube électronique série. - On peut obtenir des régulations très efficaces et très précises d'une tension continue, en utilisant le montage de la figure 22. Dans ce montage, une tension continue filtrée, supérieure à la tension réglée à obtenir, est appliquée entre les bornes E et M. On recueille la tension réglée entre les bornes S et M. Sur le circuit ES est inséré l'espace anode-cathode d'une triode T. D'autre part, entre la grille de celle-ci et la borne commune M sont connectés en série l'espace anode-cathode d'une pentode P et un tube régulateur à décharge lumineuse D. Ce tube est d'un type analogue à celui étudié au paragraphe précédent, mais peut être dimensionné pour un très faible courant. Il pourrait d'ailleurs être remplacé par un autre étalon de tension continue.

D'autre part, entre les bornes S et M sont insérées deux résistances potentiomètriques R_1 et R_2 ; dont les prises intermé-

diaires sont réunies respectivement à la grille de commande et à la grille écran de la pentode P, dont la grille de suppression est reliée à la cathode. Enfin, une résistance R_3 relie l'anode de la pentode et la borne S.

Dans ces conditions, la grille de commande de la pentode P est soumise à la différence entre une fraction fixe de la tension à régler et la tension étalon. Les variations de la tension à régler sont donc amplifiées par la pentode et transmises à la grille de la triode T; une augmentation de la tension de sortie provoque une chute de tension de cette grille, donc une augmentation de la tension anode-cathode de la triode, qui tend à combattre l'augmentation de la tension de sortie.

Un tel montage donne facilement une régulation à $\pm 0,5\%$ près.

RÉGULATION DES COURANTS

Le problème de la régulation d'un courant se pose lorsqu'on veut obtenir dans un circuit un courant constant ou peu variable, alors que la source d'alimentation en tension ou l'impédance du circuit présentent des variations.

Le problème diffère d'ailleurs assez peu, dans ses solutions générales, de celui de la régulation des tensions. Il est en outre susceptible d'une solution particulière fondée sur l'emploi de résistances autorégulatrices.

RÉSISTANCES AUTORÉGULATRICES

Une résistance autorégulatrice est constituée, en principe, d'un fil métallique dont la résistance présente un fort coefficient de température, placé dans des conditions de refroidissement telles qu'il travaille à température élevée.

Pour étudier théoriquement les conditions dans lesquelles une résistance peut être autorégulatrice, considérons un fil droit ou spiralé de longueur suffisante pour qu'on puisse négliger l'influence des extrémités. Supposons que la température de ce fil T soit uniforme; soient respectivement E, W, R les tension, puissance dissipée, et résistance par unité de longueur, I le courant.

Pour de petites variations autour d'un état d'équilibre, on peut écrire :

$$R = BT^n \qquad W = AT^{n'}$$

l'exposant n étant fonction de la nature du fil et de la température T, l'exposant n' étant également fonction de celle-ci, et dépendant en outre de la nature et de la pression du gaz ambiant.

Ces deux équations peuvent encore s'écrire :

$$\frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dT}{T}} = n \qquad \frac{\frac{dW}{W}}{\frac{dT}{T}} = n'$$

D'autre part, on a $W = RI^2 = \frac{E^2}{R}$

d'où

$$\frac{dI}{I} = \frac{1}{2}\left[\frac{dW}{W} - \frac{dR}{R}\right] = \frac{1}{2}(n' - n)\frac{dT}{T}$$

$$\frac{dE}{E} = \frac{1}{2}\left[\frac{dW}{W} + \frac{dR}{R}\right] = \frac{1}{2}(n' + n)\frac{dT}{T}$$

et finalement

$$\frac{\frac{dI}{I}}{\frac{dE}{E}} = \frac{n' - n}{n' + n} .$$

La résistance est autorégulatrice si l'on a $\frac{dI}{I} \Big/ \frac{dE}{E} \leqslant 0$, c'est-à-dire si à un accroissement de tension aux bornes correspond soit un courant stationnaire, soit même un courant décroissant. On doit donc avoir :

$$n' - n \leqslant 0 .$$

En fait, même si l'on a : $n' - n < 0$, on n'observe jamais de décroissance du courant en fonction de la tension. Cela tient au fait que le régime d'uniformité de la température du fil est alors instable : il se produit des régions chaudes qui s'étendent progressivement lorsque la tension croît.

La figure 23 montre, en fonction de la température, les courbes de variation de n pour divers métaux : fer, nickel et tungstène (courbes en trait plein) et les courbes de variation de

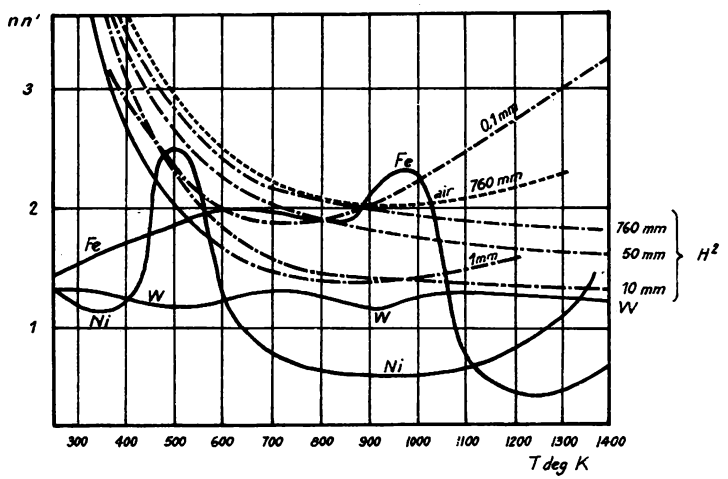


Fig. 23. - Courbes de variation des exposants n et n' pour divers métaux et gaz.

n' pour l'air à la pression atmosphérique (courbe pointillée) et pour l'hydrogène à diverses pressions (courbe en trait mixte).

On voit qu'il ne peut jamais y avoir autorégulation avec le tungstène, quelle que soit l'atmosphère. Par contre, cette autorégulation est possible avec le nickel et l'hydrogène à basse pression, pour des températures autour de 500° K.

C'est le fer qui présente les plus larges possibilités : par exemple, avec l'hydrogène à pression atmosphérique, il peut y avoir autorégulation entre 88°5 K et 1035° K.

Pratiquement, une résistance autorégulatrice présente une caractéristique courant-tension, en régime permanent, dont l'aspect est celui de la figure 21. Pour un point P de cette caractéristique, situé dans la région de régulation, elle se comporte, vis-à-vis de variations très lentes et de faible amplitude, comme si elle avait une résistance R_s déjà utilisée plus haut , égale à la pente de la droite $I_0 P$. Par contre, vis-à-vis de variations très rapides, c'est la pente de la droite OP, qui mesure la résistance de l'appareil; nous désignerons par R_d, résistance dynamique, par opposition à la résistance statique R_s, cette dernière valeur. Le rapport $\frac{R_s}{R_d}$ présente couramment dans les résistances fer-hydrogène, et pour des points situés au voisinage du milieu de la branche d'autorégulation de la caractéristique, des valeurs de l'ordre de 30 à 35.

Lorsqu'une brusque variation de tension se produit aux bornes de la résistance autorégulatrice, elle réagit donc avec la valeur de sa résistance dynamique, et la valeur de régime permanent ne s'établit qu'avec un certain retard, demandé par la mise en équilibre thermique du fil et de l'enveloppe.

Une résistance autorégulatrice ne saurait donc compenser les variations brusques. Elle introduit une constante de temps, et on voit facilement que celle-ci est d'autant plus faible que l'on fait usage de fils plus fins. La constante de temps est aussi augmentée lorsque le fil est en contact thermique avec des supports de capacité calorifique élevée.

Pratiquement, les résistances fer-hydrogène sont montées sous forme de fils spiralés ou non disposés parallèlement à l'axe d'ampoules de verre cylindriques. Les fils utilisés sont en général très fins, et, pour réduire la constante de temps, il est préférable d'en monter plusieurs en parallèle. Les fils les plus fins qu'on peut utiliser industriellement ont un diamètre de l'ordre de 0,025 mm : ils correspondent à un courant réglé à une valeur de l'ordre de 0,3 A lorsqu'on les emploie sous forme droite, non spiralée. Le spiralage permet de descendre à des valeurs de l'ordre de la centaine de milliampères; on voit qu'il n'est guère possible de construire industriellement des résistances autorégulatrices pour des valeurs de courant plus basses.

REDRESSEURS

Il ne saurait être question pour nous, dans ce chapitre, d'étudier à fond les redresseurs. Nous nous bornerons donc à rappeler les propriétés générales et les divers montages des redresseurs; nous étudierons ensuite les divers modèles de redresseurs pouvant être utilisés dans les laboratoires, que nous classerons de la manière suivante :

- Redresseurs secs,
- Redresseurs à décharge électronique,
- Redresseurs à décharge ionique.

Les onduleurs ont été peu employés jusqu'ici; nous dirons toutefois quelques mots des onduleurs à lame vibrante, assez commodes parfois pour obtenir des tensions alternatives à partir de batteries à basse tension.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES REDRESSEURS

Un élément redresseur parfait serait caractérisé par la double propriété de laisser passer le courant dans un sens sans chute de tension interne, et de s'opposer complètement à son passage dans l'autre sens quelle que soit la tension dite "tension inverse" qui est alors appliquée. Un tel redresseur parfait aurait une puissance infinie et n'existe pratiquement pas; les appareils disponibles sont caractérisés au point de vue de leur utilisation par les grandeurs permettant de définir leur puissance limite. Nous nous bornerons, pour l'instant, à définir les plus importantes, nous réservant d'y revenir dans l'étude individuelle des divers types de redresseurs :

1° Tension inverse maxima que peut supporter l'élément sans risque d'avarie. Une exagération de la tension inverse peut, selon le cas, soit provoquer une cessation brutale de l'effet redresseur, soit donner naissance à un courant inverse amenant un échauffement dangereux.

2° Courant maximum que peut supporter l'élément en régime permanent, dans des conditions de température ambiante déterminée, ce courant étant défini, selon les cas, soit par sa valeur moyenne, soit par sa valeur efficace, accompagnées ou non d'une limitation de sa valeur de crête.

Les deux grandeurs précédentes sont toujours définies en prenant un certain coefficient de sécurité.

3° Chute de tension interne dans le sens direct, nécessaire au calcul des tensions redressées en charge et du rendement. Selon les types de redresseurs, cette chute de tension peut dépendre de la valeur instantanée du courant, ou en être presque indépendante; elle peut être alors assimilée à une force contre-électromotrice.

Nous allons maintenant étudier les couplages généraux des redresseurs, en précisant dans chaque cas les valeurs des ten-

sions inverses maxima U_{max} appliquées aux éléments redresseurs ainsi que les rapports $\frac{i_m}{I_c}, \frac{i_{ef}}{I_c}, \frac{i_{max}}{I_c}$, des valeurs moyenne, efficace et maximum des courants par élément au courant redressé moyen. La connaissance de ces grandeurs, jointe à celle des rapports de transformation, permet de déterminer aisément les types d'éléments redresseurs utilisables.

Pour étudier les couplages généraux des redresseurs, on peut supposer qu'il s'agit de redresseurs parfaits, ce qui suffit pratiquement à la détermination des grandeurs précédentes.

Dans les divers schémas de montages, nous représenterons l'élément redresseur par l'un des symboles de la figure 24; le symbole a (ancienne représentation du détecteur) a été normalisé dans le cas des schémas de redresseurs secs; le symbole b est celui des valves à cathode thermionique.

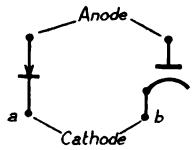


Fig. 24. -Symboles de redresseurs : a) redresseur sec; b) resseur à cathode incandescente.

REDRESSEUR MONOPHASÉ A UNE ALTERNANCE

C'est le plus simple des couplages, dont le schéma est représenté figure 25.

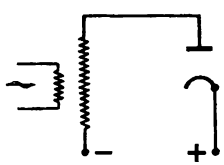


Fig. 25. - Schéma de redresseur à une alternance.

Les figures 26 a, b, c, représentent respectivement les courbes de tensions et courants obtenus lorsqu'on connecte les bornes + et - à des circuits renfermant :

a) résistance pure,

b) résistance et force contre-électromotrice,

c) résistance et inductance.

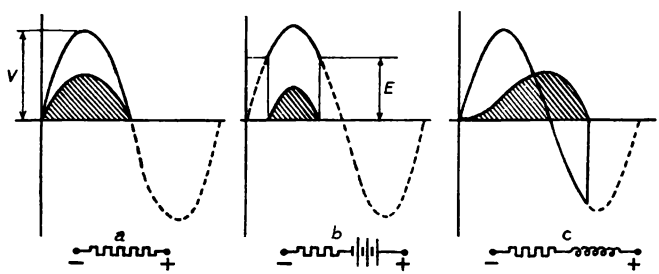


Fig. 26. - Courbe des tensions et courants pour un redresseur à une alternance.

La tension alternative du secondaire du transformateur d'alimentation y est représentée en pointillé, la tension entre + et - en trait gras, et le courant sous forme d'une aire hachurée.

Les courbes a) correspondent à la mesure de la tension à

vide par un voltmètre à cadre mobile, qui indique alors la valeur moyenne $\frac{2}{\pi} V$, V étant l'amplitude de la tension alternative.

Les courbes b) correspondent à un couplage très employé dans les petits chargeurs de batterie : elles montrent qu'un tel redresseur peut débiter tant que $E < V$, et que sa tension continue en charge peut être notablement supérieure à sa tension moyenne à vide.

Dans ce montage, on a $U_{max} = E + V$

$$\frac{i_m}{I_c} = I.$$

Quant aux rapports $\frac{i_{ef}}{I_c}$ et $\frac{i_{max}}{I_c}$, ils sont fonction de $\frac{E}{V}$; voici un tableau de quelques valeurs :

E/V	0	0,259	0,5	0,707	0,866	1
i_{ef}/I_c	1,57	1,69	1,89	2,2	2,46	∞
i_{max}/I_c	3,14	3,7	4,56	6,08	9,05	∞

On voit que les courants maximum et efficace dans l'élément peuvent être très supérieurs au courant moyen.

Enfin les courbes c montrent qu'un redresseur n'agit vraiment que sur le courant, et non sur la tension, puisque celle-ci peut s'inverser en valeur instantanée; en outre, il permet, par sa combinaison avec une inductance d'obtenir des tensions à brusque variation, ce qui a reçu des applications.

REDRESSEUR MONOPHASÉ A DEUX ALTERNANCES

Il est réalisable suivant deux schémas, représentés figure 27. Le premier, souvent désigné sous le nom de montage "bianodique" ou "biplaque", utilise un transformateur avec secondaire pourvu d'une prise médiane. Le second, connu sous le nom de "montage en pont", n'utilise qu'un transformateur simple, d'ailleurs facultatif.

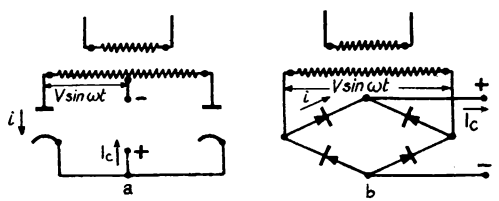


Fig. 27. - Schéma de redresseur a deux alternances : a) montage bianodique; b) montage en pont.

Le montage 27a est susceptible d'une variante, peu employée, dans laquelle l'anode des redresseurs est commune, et constitue le pôle négatif, la prise médiane étant alors le pôle positif. La figure 28a montre la forme de la tension et du courant donnés par un tel montage débitant sur résistance pure; la valeur moyenne de

cette tension est $\frac{2}{\pi}$ V, V désignant la tension de crête donnée, soit par une moitié du secondaire dans le montage de la figure 27a, soit par la totalité du secondaire dans le montage de la figure 27b. Il est à noter que, dans ce dernier montage, il y a toujours à chaque instant deux éléments redresseurs débitant en série.

La figure 28b montre la forme de la tension et du courant redressés obtenus dans un débit sur force contre électromotrice E, le courant étant limité par des résistances qui peuvent être placées, soit dans le circuit continu, soit dans le circuit des redresseurs eux-mêmes. C'est un couplage souvent utilisé dans les petits chargeurs de batteries.

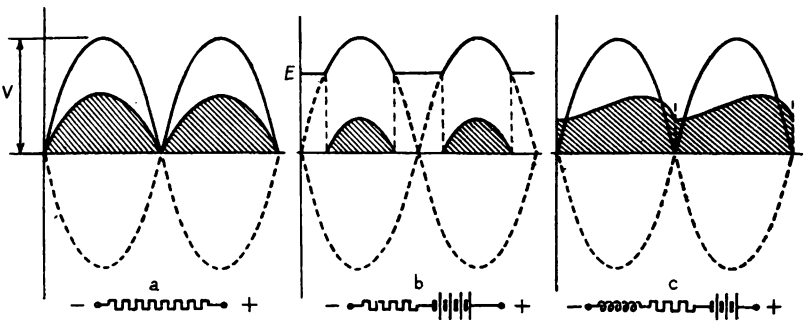


Fig. 28. - Courbe des tensions et courants pour un redresseur à deux alternances.

Enfin, la figure 28c montre les courbes de tension et courant redressés, obtenus dans un débit sur un circuit renfermant à la fois une forte inductance, une résistance et une force contre-électromotrice.

La tension inverse maximum appliquée à un élément redresseur a pour valeur 2 V dans le cas de la figure 27a, et V/2 dans le cas de la figure 27b, quelles que soient les conditions de débit.

Les rapports $\frac{i_m}{I_c}$, $\frac{i_{ef}}{I_c}$, $\frac{i_{max}}{I_c}$, dans le fonctionnement correspondant aux figures 28a et 28b, s'obtiennent en divisant respectivement par $2\sqrt{2}$ et 2 les grandeurs homologues données à propos des figures 26a et 26b.

Dans le cas correspondant à la figure 28c, on peut écrire, si l'inductance du circuit continu est très grande :

$$\frac{i_m}{I_c} = \frac{1}{2} \quad , \quad \frac{i_{ef}}{I_c} = \frac{I}{\sqrt{2}} \quad , \quad \frac{i_{max}}{I_c} = 1 \; .$$

Autres couplages monophasés. - Outre les couplages décrits plus haut, on utilise parfois, sur les redresseurs monophasés, deux autres montages :

1° Montage en doubleur de tension. - Ce montage représenté par la figure 29 comporte deux éléments redresseurs et deux condensateurs.

Nous nous bornerons à considérer la marche à vide d'un tel dispositif; le fonctionnement en charge sera étudié plus loin, à propos des procédés de filtrage.

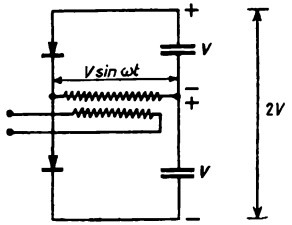


Fig. 29. - Montage en doubleur de tension.

Si V désigne l'amplitude de la tension donnée par le secondaire du transformateur, chaque condensateur se charge à la tension V, avec les polarités indiquées sur la figure 29, de sorte qu'on dispose, entre les bornes + et -, de la tension 2V, d'où le nom du montage. La tension inverse aux bornes de chaque élément redresseur a pour valeur maximum $U_{max} = 2V$.

2° Montage de Greinacher. - Ce montage, représenté figure 30, permet, étant donnée une tension alternative d'amplitude V, d'obtenir, au moins à vide, une tension continue égale à un multiple quelconque de V; il est particulièrement précieux pour la génération des tensions continues très élevées utilisées en physique nucléaire. Etudions son fonctionnement à vide : le condensateur 1-3 se charge au potentiel V par l'élément redresseur 2-3, aux bornes de ce dernier, on a la tension instantanée :

$$V_{32} = V_{31} + V_{12} = V\,(1 + \sin \omega t).$$

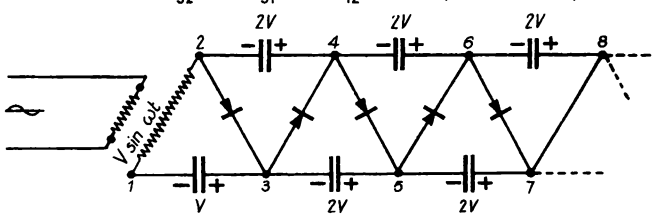


Fig. 30. - Montage de Greinacher.

Cette tension présente une valeur de crête $U_{max} = 2\ V$; elle peut donc charger le condensateur 2-4 au potentiel 2 V, avec les polarités de la figure, par l'intermédiaire de l'élément redresseur 3-4; la tension instantanée aux bornes de celui-ci est :

$$V_{43} = V_{42} + V_{23} = 2\ V - V\,(1 + \sin \omega t) = V\,(1 - \sin\ \omega t),$$

qui présente également la valeur de crête $U_{max} = 2\ V$, et peut charger le condensateur 3-5 au potentiel 2 V, avec les polarités de la figure, par l'intermédiaire de l'élément 4-5; aux bornes de celui-ci, la tension instantanée est :

$$V_{54} = V_{53} + V_{34} = 2\ V - V\,(1 \sin\ \omega t) = V\,(1 + \sin\ \omega t),$$

qui présente encore la valeur de crête $U_{max} = 2\ V$, peut charger le condensateur 4-6 et ainsi de suite. On voit immédiatement que, du côté des bornes paires, on peut avoir tous les multiples pairs de la tension V, et du côté des bornes impaires tous les multiples impairs.

Le fonctionnement en charge est plus compliqué à étudier, mais ce montage est généralement utilisé pour des débits très

faibles, auxquels le raisonnement précédent s'applique sensiblement.

REDRESSEURS POLYPHASÉS

Les redresseurs polyphasés sont généralement obtenus à partir de réseaux diphasés ou le plus souvent triphasés.

Un redresseur est dit à p phases lorsque sa courbe de tension redressée est formée de p crêtes de sinusoïdes.

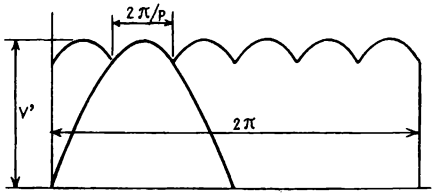


Fig. 31. - Tension d'un redresseur polyphasé.

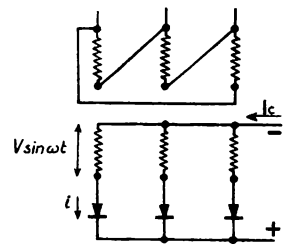


Fig. 32a. - Redresseur triphasé.

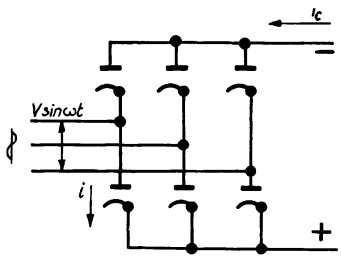


Fig. 32b. - Montage de Graetz.

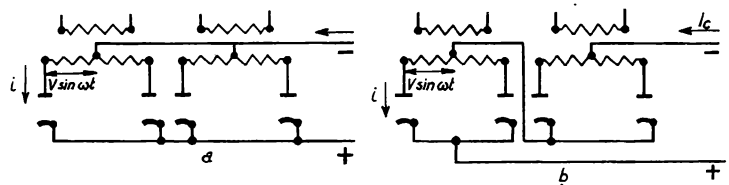


Fig. 33. - Redresseur tétraphasé :
a) montage en parallèle; b) montage en série.

La tension redressée est d'autant moins ondulée que le nombre de phases est plus grand. Nous donnerons ci-dessous les couplages correspondant aux nombres de phases usuels.

A partir des tensions à vide, les chutes de tensions en charge sont sensiblement proportionnelles au courant débité.

REDRESSEURS SECS

1° Redresseurs à oxyde cuivreux. - Les éléments redresseurs à oxyde cuivreux sont constitués par des plaques de cuivre très

pur, généralement en forme de rondelles, qui ont été soumises au traitement suivant : chauffage dans l'air vers 1.040°C au cours duquel le métal se recouvre d'une couche de Cu_2O, puis refroidissement vers 550°, au cours duquel Cu_2O se transforme superficiellement en CuO, puis trempe, à partir de cette température, dans l'eau ou tout autre liquide convenable. On doit ensuite enlever CuO (traitement par une solution de CNK), puis disposer une couche métallique de contact qui peut être : soit une rondelle de plomb, appliquée par serrage énergique, soit une couche de cuivre obtenue par réduction superficielle de l'oxyde (trempe dans l'eau alcoolisée,

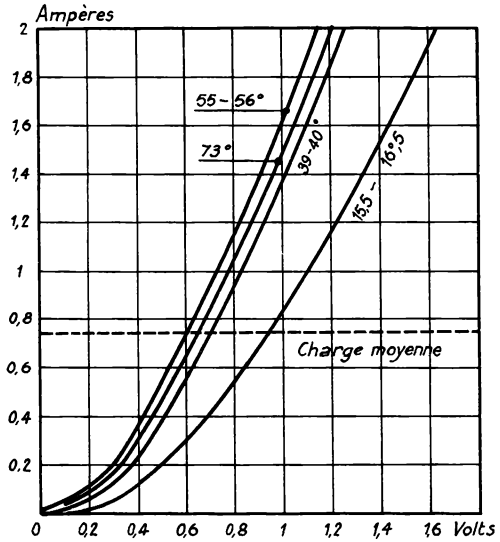


Fig. 34. - Caractéristiques d'un élément redresseur à oxyde de cuivre, à diverses températures : en courant direct.

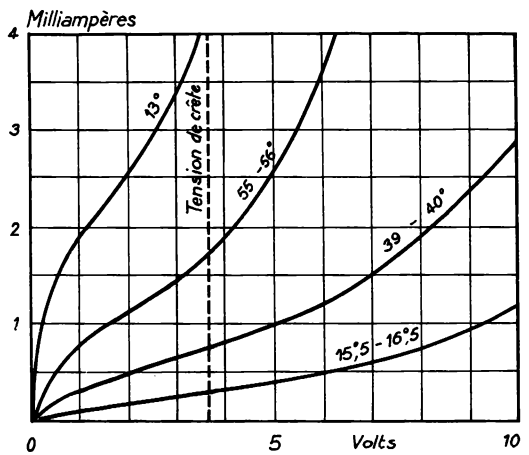


Fig. 35. - Caractéristiques d'un élément redresseur à oxyde de cuivre, à diverses températures : en courant inverse.

suivie de brunissage de la couche réduite) soit mieux une couche de zinc, appliquée au pulvérisateur Schoop.

Lorsqu'on trace les caractéristiques d'un tel élément redresseur à différentes températures, on obtient des courbes telles que celles de la figure 34. On voit qu'il y a une dissymétrie considérable dans la conductibilité électrique, et que l'appareil peut parfaitement jouer le rôle de redresseur, le courant inverse étant très petit devant le courant direct et le cuivre jouant le rôle de cathode.

Le courant direct ne suit nullement la loi d'Ohm; en fait, il est très près de varier proportionnellement au carré de la tension. La puissance instantanée perdue par le courant direct varie donc proportionnellement à la puissance 3/2 du courant. Les calculs de pertes pour diverses formes de courant direct devraient donc faire intervenir une valeur efficace spéciale définie par :

$$i_{ef}^{3/2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^{3/2} \, dx \qquad (avec \; x = \omega t) \; .$$

En pratique, on se contente de définir une résistance moyenne et d'admettre la loi d'Ohm; on donne même le plus souvent l'intensité moyenne admissible. Jusque vers 55° environ, l'élévation de température diminue la résistance au courant direct; elle augmente ensuite.

Le courant inverse, au moins jusqu'à 55°, est assez près de suivre la loi d'Ohm; il croît toujours quand la température s'élève.

L'élément dont les caractéristiques sont indiquées figures 34 et 35 est donné pour supporter un courant moyen de 0,750 A, et une tension inverse de crête de 3,5 V environ.

Il convient de noter que les caractéristiques relevées varient notablement d'un élément à l'autre, et qu'en cours de fabrication, le triage en vue de réaliser des assemblages homogènes est absolument nécessaire.

L'échauffement des redresseurs doit être limité à des valeurs très modérées. D'après les courbes de la figure 35, leur température ne doit pas dépasser 55°C environ; dans ces conditions, la vie des redresseurs est très longue (des dizaines de milliers d'heures). Si l'on dépasse cette limite, d'ailleurs assez floue, on observe un vieillissement d'autant plus rapide qu'on a été plus loin.

Lorsqu'il s'agit de redresseurs puissants, on peut avoir recours à tous les moyens de refroidissement connus : ailettes conductrices, ventilation forcée, immersion dans l'huile.

L'emploi de rondelles de grande surface conjugué avec l'utilisation de grandes ailettes conductrices permet d'atteindre des intensités moyennes unitaires de 3,5 A environ pour des tensions inverses de crête de l'ordre de 3,5 V. L'emploi du refroidissement artificiel permet de doubler sensiblement l'intensité, sans augmenter la tension inverse.

L'augmentation de celle-ci n'est possible que pour des intensités réduites car elle s'obtient en épaississant la couche d'oxydule, au prix d'une élévation de la résistance au courant direct; on peut arriver à des éléments débitant des intensités moyennes de 60 mA, pour une tension inverse de crête d'environ 7 V.

Ajoutons que le rendement des redresseurs à oxyde cuivreux varie à pleine charge, entre 50 et 70%, cette dernière valeur n'étant d'ailleurs atteinte qu'avec des éléments spécialement sélectionnés.

Les redresseurs à oxyde cuivreux sont de plus en plus abandonnés au profit des redresseurs au sélénium.

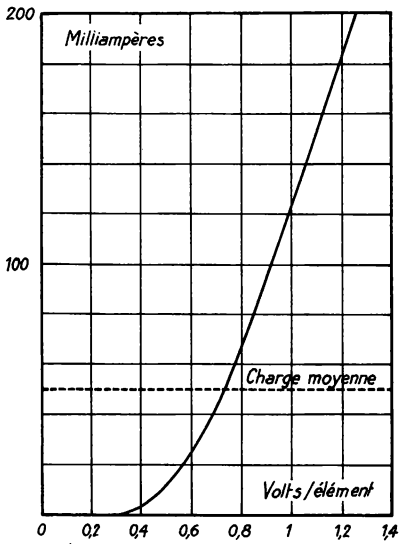


Fig. 36. - Caractéristiques d'un élément redresseur au sélénium (température ambiante) : en courant direct.

2° Redresseurs au sélénium. Les éléments redresseurs au sélénium sont constitués, comme les redresseurs à oxyde cuivreux, par des rondelles de fer cadmié, qu'on a d'abord enduites sur une face d'une couche de sélénium, amorphe ou cristallisé rouge qu'on soumet ensuite à un traitement thermique; celui-ci consiste dans un chauffage à une température d'environ 175°,5, inférieure au point de fusion du sélénium (215-220°C). Ce chauffage provoque la transformation du sélénium en sa variété "métallique" cristallisée et de couleur noirâtre. La couche active de sélénium étant obtenue, est recouverte par pulvérisation Schoop d'une mince pellicule d'un alliage très fusible, servant d'électrode de prise de contact.

Les caractéristiques d'un tel élément en courant direct et inverse sont représentées à la température ambiante de 18° par les courbes des figures 36 et 37; l'allure générale est la même

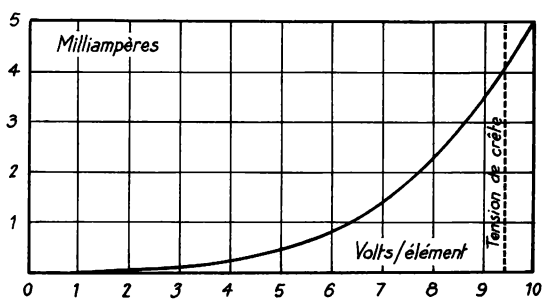


Fig. 37. - Caractéristiques d'un élément redresseur au sélénium (température ambiante) : en courant inverse.

que celle donnée par les redresseurs à oxyde cuivreux avec quelques différences; la cathode est constituée par l'électrode de prise de contact, la courbe de courant direct n'est plus assimilable à une parabole, en outre, si l'on tient compte de l'intensité moyenne de 50 mA et de la tension inverse de crête de 9,4 V environ, on voit que le courant inverse est relativement plus élevé que dans le cas de l'oxyde cuivreux. L'élévation de température diminue à la fois la résistance au courant direct et celle au courant inverse (d'environ 30% pour un échauffement de 90°).

La fabrication des redresseurs au sélénium s'est beaucoup améliorée au cours de ces dernières années. Toutefois, on voit encore apparaître sur le marché des séries défectueuses qui peuvent amener des déboires. Cela tient certainement à la qualité du sélénium employé, dont la purification reste difficile.

Les redresseurs au sélénium peuvent atteindre sans dommage des températures supérieures à celles admises sur les redresseurs à oxyde cuivreux. On limite en général cette température à 75°C.

Les procédés de refroidissement employés sont les mêmes que ceux mentionnés à propos du redresseur à oxydule. En refroidissement naturel dans l'air, on peut réaliser des éléments redressant un courant moyen de 7 A, sous une tension inverse de crête de 18 V environ.

Les rendements donnés par les redresseurs au sélénium peuvent atteindre 70 et même 90%.

Pour en terminer avec ces deux types de redresseurs, mentionnons qu'on peut les employer à des fréquences de quelques milliers de périodes par seconde; en haute fréquence, la capacité présentée pour la tension inverse peut amener des difficultés.

3° Autres redresseurs secs. - Nous ne mentionnerons que pour mémoire le redresseur sulfure de cuivre-magnésium qui a pratiquement disparu.

Un grand avenir semble réservé au redresseur au germanium qui est actuellement annoncé aux Etats-Unis comme donnant des performances remarquables : rendement atteignant 98,5%, la tension inverse dépassant 100 V par élément.

REDRESSEURS A DÉCHARGE ÉLECTRONIQUE PURE

Ces redresseurs, très employés, sont connus généralement sous le nom des "diodes" ou de "kénotrons", cette dernière désignation étant réservée d'ailleurs aux appareils à haute tension. Ils se composent d'une cathode thermionique émettrice d'électrons et d'une anode, ces deux électrodes étant contenues dans une enceinte où règne un vide très poussé.

Les cathodes thermioniques sont de deux types principaux :

1° Cathodes au baryum. - Ces cathodes sont obtenues en appliquant par divers procédés un mélange d'oxydes de Baryum et de strontium sur un support formé le plus souvent de nickel ou d'un alliage de nickel. Une telle couche d'oxydes, chauffée à 850°-

900° C est susceptible d'émettre des courants électroniques intenses, pouvant atteindre jusqu'à 500 mA/cm². L'émission se fait vraisemblablement par l'intermédiaire d'un film monoatomique de baryum adsorbé à la surface de la cathode.

Le chauffage des cathodes au baryum peut être direct ou indirect; dans le premier cas, le courant alternatif de chauffage passe directement dans le métal support de cathode, qui a généralement la forme d'un ruban plat. Si le courant "thermionique" est une fraction appréciable du courant de chauffage, il est préférable de prévoir sur l'enroulement d'alimentation une prise médiane, par laquelle sort le courant d'émission (fig.45); faute de cette précaution, des dissymétries de température sont possibles. Les tensions de chauffage direct sont généralement basses, mais ne sont limitées que par la nécessité d'adopter pour le filament une section suffisante et d'éviter une action électrostatique excessive d'une extrémité du filament sur les électrons émis par l'autre.

Dans le cas des cathodes à chauffage indirect, le courant chauffant passe dans un filament en tungstène ou molybdène, placé au voisinage de la cathode proprement dite, dont il est isolé électriquement par une matière réfractaire convenable, qui permet néanmoins la conduction thermique. Les cathodes des diodes de petite puissance sont généralement sous forme d'un tube de nickel, recouvert d'oxydes, à l'intérieur duquel se trouve un filament torsadé de tungstène, recouvert d'alumine isolante (fig. 38).

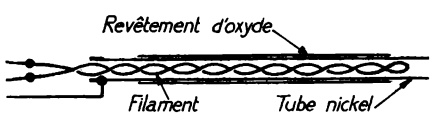


Fig. 38. - Cathode à chauffage indirect.

La prise médiane n'est pas nécessaire sur l'enroulement d'alimentation du filament. Une tension limitée à quelques dizaines de volts au plus peut être établie entre filament et cathode.

2° Cathodes au tungstène pur. - Les cathodes au tungstène pur sont toujours à chauffage direct; ce sont de simples filaments, travaillant à des températures de l'ordre de 2.500° et pouvant alors émettre des courants de saturation de l'ordre de 0,8 A/cm².

Les anodes des redresseurs à décharge électronique pure sont construites pour les tubes de faible puissance en nickel brillant ou noirci par carburation dans le but d'accroître le refroidissement par rayonnement; pour les tubes de forte puissance, on emploie des anodes de molybdène; on pourrait également utiliser le graphite. Les tubes de faible puissance sont souvent pourvus de deux anodes destinées à un montage biplaque.

La chute de tension interne des diodes ou kénotrons est une fonction croissante du courant instantané qu'ils débitent.

La loi théorique de Langmuir indique une variation du courant proportionnelle à la puissance 3/2 de la tension appliquée, tant que le courant est limité par la charge d'espace électronique entourant la cathode; c'est-à-dire tant qu'il est inférieur au courant de saturation que peut débiter la cathode à sa température de régime; lorsque le courant de saturation est atteint, il ne varie

plus avec la tension appliquée, qui peut croître considérablement. Ces lois de variations sont rarement vérifiées, par suite de diverses influences; potentiel variable de la cathode dans le cas du chauffage direct, influence des bouts froids, échauffement supplémentaire dû au courant électronique; en fait, dans bien des cas, la caractéristique est approximativement rectiligne sur une assez grande étendue (fig. 39); on peut alors définir approximativement une résistance interne, au moins quand on n'atteint pas la saturation.

Les résistances internes correspondent pour la valeur moyenne normale du courant anodique, à des chutes de tension variant de quelques dizaines de volts, pour les diodes à cathode au baryum, à quelques centaines pour les kénotrons. Dans le cas des cathodes au baryum, le courant de saturation est toujours très mal défini, et si éloigné des régions normales de travail qu'on peut n'en pas tenir compte.

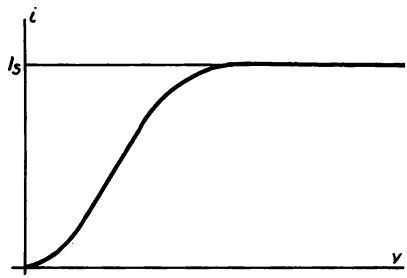


Fig. 39. - Caractéristique de diode.

Il est à noter que la puissance dépensée dans un tel redresseur par la chute interne est dissipée sur l'anode bombardée par les électrons. Lorsqu'on applique une tension inverse à une diode ou un kénotron, les phénomènes suivants peuvent se produire : tant que la valeur absolue de la tension est très faible, un faible courant inverse (quelques microampères) peut circuler, à cause des vitesses initiales d'émission des électrons. Cet effet est totalement négligeable.

Puis, lorsqu'on applique des tensions plus élevées, l'anode chauffée par le bombardement du courant direct peut être le siège d'une émission thermionique; ceci peut se produire facilement si l'on exagére la tension inverse, dans les diodes à cathode au baryum, qui présentent toujours des traces de ce métal sur l'anode. C'est même cet effet qui limite la tension inverse applicable à ce type de redresseurs aux environs de 1.000 V.

Dans les kénotrons, les anodes ne sont jamais activées, ce qui permet d'élever les tensions inverses réalisables jusqu'à des centaines de kV. Certaines précautions doivent alors être prises, en particulier du fait des attractions électrostatiques : le tungstène constituant la cathode présente à haute température une résistance mécanique réduite et doit être supporté soigneusement, de façon à éviter que les vibrations dues aux efforts électrostatiques ne prennent une amplitude suffisante pour amener sa rupture.

Donnons encore quelques indications au sujet de la protection contre les court-circuits des redresseurs à décharge électronique pure : avec les diodes à cathode au baryum, un court-circuit entraîne une forte surintensité, puisque le courant normal est très inférieur au courant de saturation; les dispositifs habituels, fusibles ou relais à maxima d'intensité sont donc applicables. Il n'en

est pas de même dans le cas des kénotrons, où le courant de saturation, souvent peu supérieur au courant normal, empêche la surintensité; il se produit alors une élévation anormale de la chute de tension directe et de la dissipation anodique dans les valves, pouvant amener leur destruction.

Les fusibles ou relais à maxima doivent alors être remplacés par des dispositifs différents, par exemple relais à minima de tension continue.

REDRESSEURS A DÉCHARGE IONIQUE

Les redresseurs à décharge électronique pure ne peuvent débiter que des courants très limités : même si l'on employait des cathodes susceptibles de débiter des courants intenses, la charge d'espace électronique qui les entoure oblige à appliquer des tensions élevées sur l'anode pour obtenir la valeur totale du débit. Le rendement de ces appareils ne peut donc être acceptable que si l'on utilise une faible partie de l'émission électronique (cas des redresseurs de faible puissance utilisant des diodes à cathode au baryum) ou si l'on travaille à des tensions très élevées (redresseurs à kénotrons).

Il existe heureusement un moyen de faire disparaître la charge d'espace et son influence néfaste : il suffit d'introduire dans le tube un gaz inerte ou une vapeur métallique convenablement choisie. Dans ces conditions, il se forme dans des régions étendues des tubes à décharge un milieu auquel Langmuir a donné le nom de plasma, renfermant des atomes neutres, des électrons libres et des ions positifs, dont la charge neutralise exactement celle des électrons.

L'existence du plasma est entretenue par l'ionisation des atomes neutres sous l'action des électrons, tant du fait de leur vitesse d'agitation que de leur vitesse d'ensemble; d'autre part, les électrons se recombinent avec les ions, soit sur les parois du récipient, soit dans l'intérieur du plasma; ce dernier cas ne se produit guère qu'aux pressions élevées, où la diminution des libres parcours et des vitesses d'agitation des électrons rend fréquentes leur capture par les ions.

Un plasma résiduel peut survivre à un plasma normal après la cessation du passage du courant, pendant une durée appréciable, d'autant plus grande que la pression est plus élevée.

Lorsqu'on plonge une électrode dans un plasma, et qu'on lui applique une tension positive croissante par rapport à l'espace, l'électrode s'entoure d'abord d'une mince gaine d'électrons, formant une charge d'espace négative limitant le courant; cette gaine s'épaissit lorsque la tension croit, jusqu'au moment où celle-ci atteint le potentiel d'ionisation des atomes neutres; à ce moment, des ions se produisent en abondance dans la gaine, qui disparaît, aucune charge d'espace ne limitant plus le courant.

Lorsqu'on applique, au contraire, à l'électrode, une tension négative, elle s'entoure d'une gaine d'ions positifs, à l'intérieur de laquelle se trouve la presque totalité de la tension; cette gaine

est d'autant plus mince et le champ est d'autant plus intense que la concentration ionique est plus élevée dans le plasma.

Ce phénomène se produit en particulier dans les redresseurs au sein du plasma résiduel entourant l'anode, lorsque celle-ci est soumise à la tension inverse; un très faible courant inverse se produit, dont l'influence est négligeable dans les conditions normales; si la densité du plasma résiduel est forte, le bombardement ionique qui en résulte sur l'anode peut déterminer l'apparition d'une tache cathodique, point de départ d'une émission électronique intense; c'est le phénomène de l'allumage en retour, qui entraîne la cessation temporaire de l'effet redresseur.

Ces phénomènes généraux se présentent dans tous les redresseurs utilisant des décharges avec plasma; nous devons maintenant étudier les formes pratiques de ces appareils. On peut en distinguer trois classes :

1° Redresseurs à cathode chaude à haute pression. - Ces appareils, désignés le plus souvent sous le nom de "valves" présentent une cathode à émission thermionique et une ou plusieurs anodes, plongées dans une atmosphère d'un gaz inerte (argon le plus souvent) sous une pression assez élevée pouvant atteindre quelques dizaines de millimètres de mercure. Dans certains types de ces appareils, on ajoute de la vapeur de mercure. La pression gazeuse est suffisamment élevée pour ralentir l'évaporation de la cathode, de sorte que celle-ci peut fournir une émission plus forte que si elle était plongée dans le vide. La rançon de cette augmentation de puissance est une limitation à des valeurs de l'ordre de 150 V de la tension de crête inverse, du fait de l'importance du plasma résiduel.

Le prototype de ces appareils, depuis longtemps utilisé à la charge de batteries, est le redresseur Tungar, caractérisé par l'emploi d'une cathode en tungstène pur et d'une atmosphère d'argon. Les modèles les plus courants peuvent redresser une intensité moyenne de 6 à 15 A sous des tensions de 6 V à 80 V. Les valves Tungar demandent pour leur fabrication du tungstène de bonne qualité qu'on n'a pas toujours trouvé en Europe; les valves d'origine américaine ont donné, en général, de meilleurs résultats.

L'emploi de cathodes à oxyde de baryum à chauffage direct avec atmosphère d'argon ou argon mercure est préférable : on trouve actuellement des valves de ce type qu'on peut substituer aux Tungar, ou utiliser sur des modèles spéciaux de redresseurs. Certaines sont bianodiques, mais la plupart monoanodiques.

La chute de tension interne dans ces valves est de l'ordre de 9 à 12 V et varie peu avec la charge. Les tensions de chauffage des cathodes, toujours très basses, varient de 1,75 à 2,5 V.

2° Redresseurs à cathode chaude et à basse pression. - Ces appareils, qui ont reçu des Américains le nom de "phanotrons" (et de "thyratrons" lorsqu'ils sont munis de grilles de commande), renferment une cathode au baryum et une anode, plongées dans une atmosphère de vapeur de mercure (pression variable avec la température entre 3 et 30 baryes) ou de gaz rare (argon ou hélium) sous pression de quelques dizaines de baryes. Avec d'aussi faibles

pressions, on doit toujours maintenir le courant débité par la cathode au-dessus de la valeur correspondant à l'émission thermionique pure. Si l'on dépasse cette valeur, il apparaît à la cathode une chute de tension élevée et la cathode se désagrège sous le bombardement des ions positifs. Il s'ensuit qu'on doit adopter pour la cathode un coefficient de sécurité suffisant, en la rendant capable de débiter sinon les plus fortes surintensités possibles, du moins une fraction importante, tout en prévoyant des dispositifs de coupure efficaces et rapides.

Cette condition peut être remplie sans puissances de chauffage exagérées, par calorifugeage des cathodes, en les constituant soit par un ruban plat replié sur lui-même (chauffage direct), soit par des surfaces entourées d'une enceinte de nickel poli (chauffage indirect). On peut ainsi abaisser les puissances de chauffage jusqu'à 0,6 watt par ampère d'émission cathodique.

Les tensions de chauffage des cathodes à chauffage direct doivent être très basses, de manière qu'elles ne puissent pas donner lieu à des phénomènes d'ionisation cumulative; une valeur de 2,5 V paraît un maximum. Dans les cathodes à chauffage indirect, rien n'empêche, moyennant un isolement convenable, d'adopter des tensions plus élevées : en fait, on a pu aller jusqu'à 110 volts.

Pour toutes ces cathodes, il est nécessaire de les mettre en chauffage un temps suffisant (de quelques minutes à 30 minutes) avant de laisser passer le courant anodique; autrement, on risquerait de ne pas avoir une émission suffisante et de désagréger la couche d'oxyde.

La chute de tension interne des phanotrons et thyratrons est sensiblement indépendante de la charge, et varie entre 9 et 12 volts, selon le type et le gaz de remplissage. Les courants moyens utilisables peuvent varier de quelques ampères à 200 ampères environ.

Quant aux tensions de crête utilisables, elles varient de quelques centaines de volts pour les tubes à remplissage de gaz rare, jusqu'à 20 kV pour des tubes à remplissage de vapeur de mercure; dans ce dernier cas, une seule goutte de ce métal est placée dans une partie du tube dont la température peut être commandée facilement, ce qui permet de régler à volonté la pression. Des constructions spéciales, utilisant des électrodes intermédiaires en cascade, permettent d'élever les tensions inverses des tubes à mercure à une centaine de kV, sous faible débit.

Les phanotrons et thyratrons peuvent être utilisés dans des couplages quelconques de redresseurs : il convient toutefois de se méfier des montages comportant des condensateurs directement placés entre bornes continues : doubleur de tension, Greinacher, filtres avec condensateur d'entrée, car les valeurs instantanées des courants peuvent y être très supérieures aux valeurs moyennes, et il importe d'en tenir compte, si l'on ne veut courir le risque de désagréger les cathodes.

3° Redresseurs à vapeur de mercure et analogues. - Ces redresseurs sont caractérisés par l'emploi comme cathode d'un bain métallique liquide. C'est le mercure qui est le plus fréquem-

ment utilisé, l'atmosphère intérieure est alors constituée par de la vapeur de mercure pure.

La source d'électrons est alors constituée par la tache cathodique, point brillant qu'on voit se déplacer à la surface du bain métallique. La tache cathodique n'est établie que si le courant qui la traverse est supérieur à une valeur minimum qui est d'environ 3 A pour le mercure pur.

Un redresseur à vapeur de mercure ne peut donc fonctionner que si le courant qui traverse sa cathode est supérieur à la valeur minima de maintien de la tache cathodique.

C'est là le but du circuit d'entretien : ce circuit comporte pour les redresseurs à mercure, dans le récipient redresseur lui-même, deux anodes situées au voisinage de la cathode, et connectées à un montage de redresseur monophasé à deux alternances fonctionnant en court-circuit sur lui-même (fig.40). Le courant est limité par les inductances d'anodes 1 et 2 (qui peuvent être remplacées par des résistances) et filtré par l'inductance de cathode 3. Des résistances de décharge 4 et 5 sont branchées entre les anodes d'entretien 6 et 7 et la cathode 8, de façon à écouler les surtensions qui peuvent se produire lors des extinctions accidentelles de l'arc d'entretien. La tension fournie par le secondaire à prise médiane 8 du transformateur est de 2 × 60 V pour les redresseurs à faible puissance à ampoule de verre, et de 2 × 120 V pour les redresseurs métalliques de grande puissance. Le primaire 9 est alimenté sous la tension du réseau.

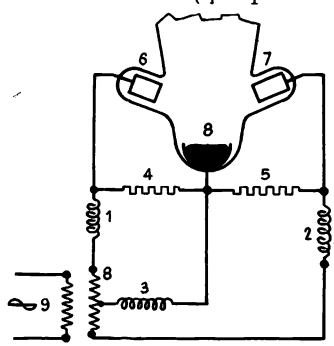


Fig. 40. - Schéma de montage de redresseur à vapeur de mercure.

La tache cathodique ne s'amorce pas spontanément à la surface du bain de mercure : pour la faire naître, le procédé le plus employé consiste à rompre un courant entre le mercure et une électrode mobile située à son voisinage. Celle-ci est munie généralement d'une partie magnétique qui se meut dans le champ d'un électro-aimant extérieur au récipient. Lorsque l'allumage est obtenu, le courant passe dans le circuit d'entretien et un relais convenable coupe l'alimentation de l'électro-aimant d'allumage, ainsi que celle de l'électrode, qui doit être isolée en fonctionnement normal (autrement on observe parfois, sans qu'on puisse l'expliquer, des apparitions de taches cathodiques sur cette électrode, qui peut alors être détériorée).

Les redresseurs à vapeur de mercure peuvent supporter des courants très intenses : jusqu'à 500 ampères pour les redresseurs à ampoule de verre, et 8.000 ampères pour les redresseurs à cuve métallique et pompage permanent. Ces intensités peuvent être atteintes pour des tensions redressées inférieures ou égales à 600 volts; elles doivent être réduites pour les tensions plus élevées, la puissance disponible croissant d'ailleurs avec celles-ci.

Les tensions inverses que peuvent supporter, en service prolongé, les redresseurs à mercure correspondent, pour les types à ampoule de verre, à des tensions continues de 6 à 7.000 volts (intensités maxima correspondantes : 30 à 40 ampères); pour les redresseurs métalliques, on a pu aller, par une construction spéciale, jusqu'à 50 kV, on réalise couramment 20 kV avec des intensités de quelques dizaines d'ampères.

Les redresseurs à vapeur de mercure sont presque toujours polyanodiques : de 2 à 6 anodes pour ceux à ampoules de verre, de 6 à 18 anodes pour ceux à cuves métalliques. Ils peuvent également être monoanodiques.

Nous mentionnerons également, pour mémoire, les ignitrons qui sont des redresseurs à bain de mercure, dans lesquels la tache cathodique est amorcée au début de chaque intervalle de conduction par une impulsion de courant circulant dans le contact entre une électrode semi-conductrice et la cathode. Ces appareils sont toujours monoanodiques.

FILTRAGE DES COURANTS REDRESSÉS

Bien que les tensions fournies par les redresseurs soient parfois utilisables directement, par exemple, à la charge d'accumulateurs ou à l'alimentation de moteurs, il est le plus souvent nécessaire de les filtrer. La qualité du filtrage dépend de l'application envisagée et seule l'expérience permet de la déterminer.

On peut la caractériser par le taux brut d'ondulation, mais ce n'est pas toujours suffisant : ainsi, lorsqu'il s'agit d'alimentation d'amplificateurs destinés à l'écoute, il convient de tenir compte de la sensibilité de l'oreille dont nous rappelons figure 41 la variation en fonction de la fréquence.

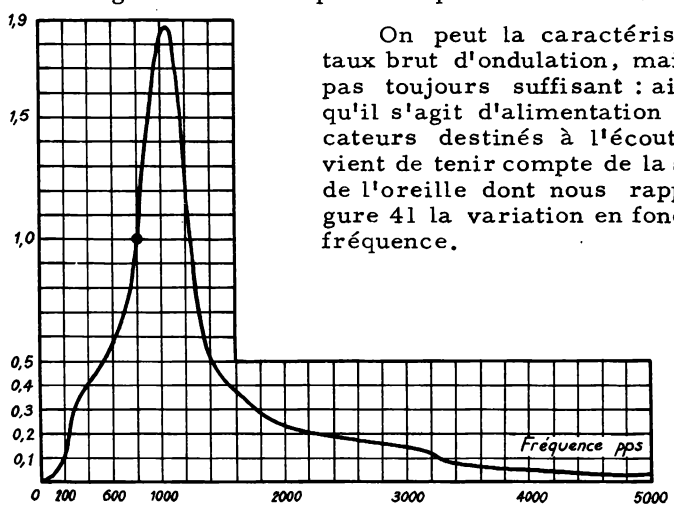


Fig. 41. - Courbe des sensibilités auditives aux tensions de diverses fréquences (sensibilité à la fréquence 800 prise comme unité.

Dans ce qui suivra, nous indiquerons d'abord les pourcentages d'harmoniques donnés par les montages usuels de redresseurs; nous étudierons ensuite les principes généraux et les propriétés

des filtres et nous terminerons par l'étude pratique de leurs éléments constructifs.

HARMONIQUES DES TENSIONS REDRESSÉES

Considérons un montage de redresseur polyphasé, de nombre de phases p, supposé constitué par des valves sans résistance intérieure, alimentées par des transformateurs sans impédance, et fournissant une tension moyenne U, dans laquelle peut être incluse la chute de tension interne des valves si ces dernières sont du type à arc.

A cette tension moyenne se superposent :

1° Des harmoniques de tension réguliers, de fréquence multiple de p fois celle du réseau : n = kp. L'amplitude relative de l'harmonique n, mesurée par rapport à la composante moyenne de tension, a pour expression

$$\frac{U_n}{U_c} = \frac{2}{2n^2 - 1} \qquad (1)$$

On en déduit alors le tableau suivant des amplitudes des harmoniques réguliers des redresseurs, de nombres de phases usuels :

	p = 2	p = 3	p = 6	p = 12
k = 1	0,66 (n = 2)	0,25 (n = 3)	0,057 (n = 6)	0,014 (n = 12)
k = 2	0,133(n = 4)	0,057 (n = 6)	0,014 (n = 12)	0,003 (n = 24)
k = 3	0,057(n = 6)	0,025 (n = 9)	0,006 (n = 18)	0,001 (n = 36)

2° Des harmoniques de tension irréguliers, pouvant provenir d'une dissymétrie du montage redresseur, par exemple, due aux transformateurs ou aux valves de chute interne différente. La plus basse fréquence ainsi introduite est évidemment celle du réseau d'alimentation; toutefois, dans un montage bien construit, il est facile d'éviter ces harmoniques.

Une autre cause d'harmoniques irréguliers réside, dans le cas d'une alimentation par un réseau triphasé, dans le déséquilibre de celui-ci, défini par le rapport de la composante inverse V_i à la composante directe V_d de tension. Les harmoniques irréguliers ont alors pour rang par rapport au réseau, p étant évidemment multiple de 3 :

a) n = kp + 2; l'amplitude relative du terme n est alors :

$$\frac{U_n}{U_c} = \frac{1}{n-1} \frac{V_i}{V_d} \qquad (2)$$

b) n = kp - 2; l'amplitude relative du terme n est alors :

$$\frac{U_n}{U_c} = \frac{1}{n+1} \frac{V_i}{V_d} \qquad (3)$$

Quel que soit p, le principal harmonique irrégulier est n = 2, dont l'amplitude relative est simplement :

$$\frac{U_2}{U_c} \frac{V_i}{V_d} \frac{1}{\cos \varphi} .$$

Dans le cas d'un redresseur monophasé symétrique, redressant deux alternances, il n'existe évidemment que les harmoniques réguliers.

Dans le cas d'un redresseur monophasé sans grille redressant une alternance, la tension redressée renferme le fondamental du réseau, d'amplitude relative $\pi = 3;14$ et la suite des harmoniques n pairs, d'amplitudes $\frac{4}{n^2 - 1}$.

Les valeurs précédentes sont légèrement modifiées par l'introduction des impédances du montage redresseur, mais restent assez approchées pour la pratique; par contre, elles sont inapplicables lorsque le filtre renferme un condensateur d'entrée; ce point sera examiné plus loin.

PRINCIPES ET PROPRIÉTÉS DES FILTRES A COURANTS REDRESSÉS

Deux principes généraux sont utilisés dans les filtres de redresseurs :

A) FILTRAGE PAR INDUCTANCE ET FAIBLE IMPÉDANCE

Le schéma général est celui de la figure 42; les bornes 1 du redresseur sont connectées aux bornes d'utilisation 2 par l'intermédiaire d'une inductance L. En dérivation sur le circuit d'utilisation est branchée une impédance Z présentant par rapport à lui une faible impédance pour les fréquences à éliminer et s'opposant au passage de la composante continue. L'ensemble de l'inductance L

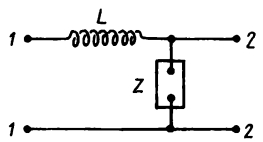


Fig. 42. - Schéma d'un filtre à une cellule.

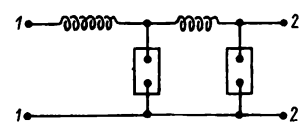


Fig. 43. - Schéma d'un filtre à deux cellules.

et de l'impédance Z constitue ce qu'on appelle une cellule; un filtre peut comporter une ou plusieurs cellules, qui sont alors montées en cascade, comme l'indique la figure 43 représentant un filtre à deux cellules. Les impédances Z peuvent être constituées, soit par des capacités (filtres à inductance-capacité); soit par des circuits résonants accordés sur les fréquences à éliminer (filtres à résonance), soit par une batterie d'accumulateurs (filtrage par batterie-tampon).

1°) Filtres inductance-capacité :

a) Filtres à une cellule. - Soit (fig. 44) un redresseur branché sur les bornes 1 et débitant sur un circuit de résistance R par l'intermédiaire d'une cellule formée d'une inductance L et d'une

capacité C. Une telle cellule de filtrage, associée au circuit d'utilisation R, peut être caractérisée par deux variables réduites :

sa pulsation propre : $\Omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (4)

son degré d'amortissement : $a = \frac{1}{2\Omega RC}$ (5)

proportionnel au rapport de sa période propre à la constante de temps de l'ensemble CR. On a toujours pratiquement $a < 1$. Ces deux variables permettent de déterminer L et C.

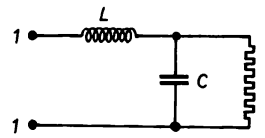


Fig. 44. - Filtre inductance capacité à une cellule.

Pour étudier le comportement d'une telle cellule, on peut considérer successivement les perturbations venant du redresseur et du circuit de charge, soit en régime permanent, soit en régime variable.

En régime permanent, une tension U, de pulsation ω provenant du redresseur, donne à la sortie du filtre une tension u, et le rapport d'étouffement U/u de la cellule est, comme on le voit facilement :

$$\varepsilon = \frac{U}{u} = \sqrt{(\omega^2 LC - 1)^2 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}} = \sqrt{\left(\frac{\omega^2}{\Omega^2} - 1\right)^2 + 4a^2 \frac{\omega^2}{\Omega^2}} \quad . \quad (6)$$

L'allure de la variation de ε en fonction de $\frac{\omega}{\Omega}$ est donnée par la courbe de la figure 45. On voit que pour une fréquence croissante le rapport d'étouffement est d'abord inférieur à l'unité (il y a donc amplification de la pulsation), passe par un minimum égal à $2a\sqrt{1-a^2}$, pour $\frac{\omega}{\Omega} = 1 - 2a^2$ (résonance), puis croît; l'étouffement réel ($\varepsilon \geqslant 1$) commence pour la valeur :

$$\frac{\omega}{\Omega} = \sqrt{2(1-2a^2)}$$

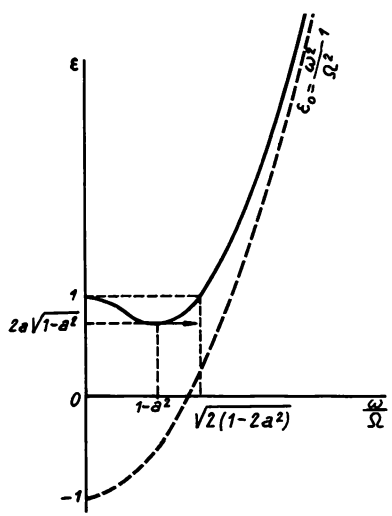


Fig. 45. - Variation du rapport d'étouffement d'un filtre à une cellule inductance capacité.

Pour les grandes valeurs de $\frac{\omega}{\Omega}$, la courbe est asymptote à la parabole :

$$\varepsilon_0 = \frac{\omega^2}{\Omega^2} - 1 \quad (7)$$

On doit donc toujours prendre $\Omega < \frac{\omega_{min}}{\sqrt{2(1-2a^2)}}$, ω_{min} étant la pulsation minimum présente dans les harmoniques de tension redressée; cette inégalité est sûrement satisfaite si l'on a :

$$\Omega \leqslant \frac{\omega_{min}}{\sqrt{2}} \quad . \quad (8)$$

La cellule sera donc toujours efficace si l'on prend pour sa pulsation propre une valeur inférieure au quotient par $\sqrt{2}$ de la plus faible pulsation présente dans la tension redressée; cette dernière étant, comme nous l'avons vu, soit la pulsation propre du réseau, soit le double de celle-ci. Dans ce cas, l'étouffement pour la fréquence ω_{min} est $\sqrt{1 + 8a^2}$ qui croît avec a.

Nous devons également examiner, en régime permanent, l'action d'une modulation de pulsation ω sur la charge du circuit d'utilisation : nous supposons que celui-ci absorbe une charge $I \sin \omega t$, superposée à une charge continue I_c ; il en résulte une tension d'amplitude u et de pulsation ω à la sortie du filtre. Si l'on admet que l'impédance du redresseur est négligeable pour la pulsation ω , on trouve que le rapport de la tension u à la composante moyenne U_c de la tension continue a pour valeur :

$$\frac{u}{U_c} = 2a \frac{\frac{\omega}{\Omega}}{\frac{\omega^2}{\Omega^2} - 1} \frac{I}{I_c} \qquad (9)$$

le degré d'amortissement a étant ici défini en prenant pour résistance équivalente du circuit d'utilisation la valeur $\frac{U_c}{I_c}$.

La formule (9) montre que l'influence d'une charge modulée est d'autant plus grande que la fréquence est plus voisine de la fréquence propre de la cellule et que l'amortissement de celle-ci est plus grand.

On peut également étudier l'influence des régimes variables sur une cellule de filtrage; un tel régime variable peut être, soit l'établissement brusque ou graduel de la tension redressée à l'entrée du filtre, soit une coupure ou un rétablissement total ou partiel de la charge à la sortie.

On trouve alors que l'établissement brusque de la tension du redresseur donne lieu, à la sortie du filtre, à une surtension d'autant plus grande que le degré d'amortissement est plus faible; cette surtension est suivie d'oscillations. Il en est d'ailleurs de même pour un établissement graduel, mais la surtension diminue en même temps que la rapidité de celui-ci.

Quant à la coupure et au rétablissement total ou partiel de la charge, ils donnent lieu à des oscillations débutant respectivement par une surtension ou une baisse de tension d'autant plus grandes que le degré d'amortissement est plus grand.

Nous voyons donc qu'une cellule de filtrage se comporte d'autant mieux vis-à-vis des perturbations provenant du redresseur que son degré d'amortissement est plus grand; c'est l'inverse qui se produit vis-à-vis des perturbations provenant du circuit d'utilisation.

Les formules précédentes ont été établies en faisant abstraction de l'effet redresseur lui-même; or, le filtrage de l'harmonique

de pulsation ω de la tension redressée se produit grâce à la circulation du courant d'amplitude :

$$j = \frac{U}{\varepsilon}\sqrt{\frac{1}{R^2} + \omega^2 C^2} = I_c \frac{U}{U_c}\frac{I}{\varepsilon}\sqrt{I + \frac{\omega^2}{\Omega^2}\frac{1}{4a^2}} \qquad (10)$$

qui donne lieu à une chute de tension dans l'inductance L. Les courants de circulation dus aux divers harmoniques s'ajoutent au courant continu; supposons que celui-ci diminue : chaque courant j tend vers la limite :

$$j_{lim} = \frac{\omega CU}{\omega^2 LC} .$$

Il arrive un moment où la valeur maxima de la résultante de ces courants devient égale à la composante continue du courant; si on diminue la charge au-dessous de la valeur correspondante (que nous appellerons charge critique) le mécanisme du filtrage change, le redresseur présentant un débit interrompu; en même temps, sa tension moyenne, sensiblement constante au-dessus de la charge critique, se relève progressivement jusqu'à la tension de crête du redresseur, qu'elle atteint pour la marche à vide. Nous verrons plus loin, à propos du filtrage par capacité pure, le cas extrême de ce mécanisme.

La charge critique I_k d'un filtre ne peut se déterminer que si l'on admet, ce qui est généralement le cas, que l'un des courants d'harmoniques domine de loin les autres. Dans ce cas, I_k est simplement donnée par la formule (10) dans laquelle $\frac{\omega^2}{\Omega^2}$ est évidemment grand si la qualité du filtre est bonne, on peut alors écrire sensiblement :

$$\frac{I_k}{I_c} = \frac{U}{U_c}\frac{1}{\varepsilon_0}\frac{\omega}{\Omega}\frac{1}{2a} ,$$

qui montre que la charge critique varie en sens inverse du degré d'amortissement.

Si donc la charge d'un redresseur varie dans des limites importantes et si l'on tient à conserver à sa tension une valeur sensiblement constante, il importe de maintenir la charge critique au-dessous de la charge minima; il est alors interdit d'abaisser trop le degré d'amortissement. Or, nous avons vu que dans le cas de variations rapides de la charge, on doit adopter au contraire la plus faible valeur possible pour ce degré d'amortissement, sous peine d'observer des oscillations de régime variable de grande amplitude. Il y a là une contradiction, qui correspond heureusement à des conditions peu fréquentes; dans ce cas, l'emploi de filtres à deux cellules permet de résoudre le problème de façon plus satisfaisante.

b) Filtres à deux cellules. - Soit un redresseur muni de deux cellules de filtrage en cascade (fig.46); étudions successivement le comportement du filtre vis-à-vis des perturbations venues du redresseur et de la charge.

Une tension d'entrée U de pulsation ω est réduite à la valeur u, le rapport d'étouffement étant, avec les notations de la figure 46

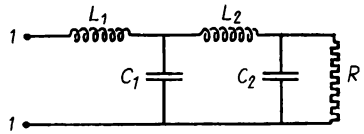


Fig. 46. - Filtre inductance-capacité à 2 cellules.

$$\frac{U}{u}=\sqrt{\left[(1-\omega^2 L_1 C_1)(1-\omega^2 L_2 C_2)-\omega^2 L_1 C_2\right]^2+\left[\frac{\omega L_1}{R}+\frac{\omega L_2}{R}(1-\omega^2 L_1 C_1)\right]^2}$$

Au cas particulier, le plus fréquent, où les deux cellules sont accordées sur la même pulsation Ω, on a en introduisant les degrés d'amortissement :

$$a_1=\frac{1}{2\Omega C_1 R}\ , \qquad a_2=\frac{1}{2\Omega C_2 R}$$

$$\frac{U}{u}=\sqrt{\left[\left(\frac{\omega^2}{\Omega^2}-1\right)^2-\frac{\omega^2}{\Omega^2}\frac{a_1}{a_2}\right]^2+\frac{4\omega^2}{\Omega^2}a_1^2\left[\frac{a_2}{a_1}\left(\frac{\omega^2}{\Omega^2}-1\right)-1\right]^2} \qquad (11)$$

qui permet d'étudier la variation de $\frac{U}{u}$ en fonction de $\frac{\omega}{\Omega}$, connaissant les degrés d'amortissement a_1 et a_2.

Si nous admettons pour la fréquence propre du filtre la limite donnée par la formule (8), l'étouffement de la fréquence minima provenant du redresseur est :

$$\frac{U}{u}=\sqrt{\left(\frac{2a_1}{a_2}-1\right)^2+8a_1^2\left(1-\frac{a_2}{a_1}\right)^2} \qquad (12)$$

qui montre que, si $a_1 > a_2$, ce qui est généralement le cas, comme nous allons le voir, l'étouffement limite est augmenté aussi bien par l'augmentation de a_1 que par la diminution de a_2.

Remarquons que, dans tous les cas, la courbe de $\frac{U}{u}$ est asymptote pour les valeurs élevées de $\frac{\omega}{\Omega}$ à la courbe de $\frac{U}{u}=\varepsilon_0^2$.

En ce qui concerne l'influence de la superposition d'une charge $I\sin\omega t$ à la charge continue I_c, la tension u qui en résulte à la sortie du filtre a pour valeur relative par rapport à la tension redressée moyenne :

$$\frac{u}{U_c}=2a_2\frac{\frac{\omega}{\Omega}}{\frac{\omega^2}{\Omega^2}-1}\cdot\frac{I}{I_c}\cdot\frac{1-\frac{a_1}{a_2}\frac{1}{\frac{\omega^2}{\Omega^2}-1}}{1-\frac{a_1}{a_2}\frac{\frac{\omega^2}{\Omega^2}}{\left(\frac{\omega^2}{\Omega^2}-1\right)}} \qquad (13)$$

Lorsque $\frac{\omega}{\Omega}$ augmente, la dernière fraction du second membre tend rapidement vers l'unité; on retrouve simplement la formule

relative au filtre réduit à la seconde cellule, dont l'influence se révèle prédominante.

En ce qui concerne, enfin, la charge critique d'un filtre à deux cellules, on trouve pour sa valeur, ω et u désignant alors la fréquence et l'amplitude à la sortie du filtre de l'harmonique prédominant :

$$\frac{I_k}{I_c} = \frac{u}{U_c} \sqrt{\frac{\omega^2}{4\,\Omega^2}\,\frac{1}{a_1^2}\left(\frac{\omega^2}{\Omega^2} - 1 - \frac{a_1}{a_2}\right)^2 + \left(1 - \frac{\omega^2}{\Omega^2}\,\frac{a_2}{a_1}\right)^2} \,. \qquad (14)$$

Si $\frac{\omega^2}{\Omega^2} - 1$ a une valeur élevée devant $\frac{a_1}{a_2}$, cette formule se réduit sensiblement à

$$\frac{I_k}{I} = \frac{u}{U_c}\,\frac{1}{\varepsilon_0}\,\frac{\omega}{\Omega}\,\frac{1}{2a_1} \,,$$

qui montre l'influence prédominante de la première cellule.

Il devient donc possible, avec un filtre à deux cellules, de concilier une faible charge critique avec un comportement satisfaisant vis-à-vis des modulations de la charge redressée : il suffit d'adopter un degré d'amortissement grand pour la première cellule et petit pour la seconde. La réaction aux régimes variables est également plus satisfaisante. Il convient d'ajouter que, la fréquence maxima des cellules étant toujours fixée, un filtre à deux cellules est beaucoup plus onéreux qu'un filtre à une seule cellule.

2°) Filtres à résonance :

Dans ce type de filtres, dont le schéma est représenté par la figure 47, le condensateur de filtrage est remplacé par un ensemble de circuits résonants L_1 C_1 , L_2 C_2 ... accordés respectivement sur les divers harmoniques à éliminer. Un tel type de filtre n'est employé que pour des redresseurs de grande puissance tels que ceux utilisés en traction; dans ce cas, en effet, la réalisation d'impédances suffisamment faibles est moins coûteuse avec des circuits résonants qu'avec des capacités pures. Nous n'insisterons pas sur ce type de filtre, qui n'offre guère d'intérêt dans les laboratoires.

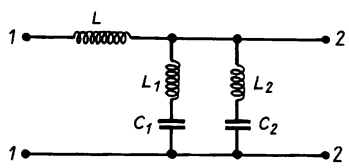


Fig. 47. - Filtre à résonance.

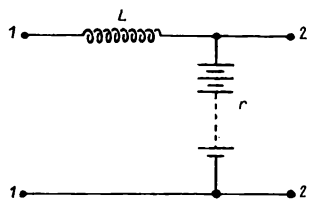


Fig. 48.
Filtrage par batterie-tampon.

3°) Filtrage par batterie-tampon :

Mentionnons enfin, pour mémoire, le filtrage par batterie-tampon (fig. 48), dans lequel l'étouffement de la pulsation ω a pour

valeur $\sqrt{\frac{\omega^2 L^2}{r^2} + 1}$, si l'on suppose la résistance interne r de la batterie petite devant celle du circuit d'utilisation 2.

B) FILTRAGE PAR CAPACITÉ PURE

Considérons (fig.49) un redresseur, entre les bornes 1 duquel est branché un condensateur C; en général, un tel condensateur d'entrée est suivi d'une ou plusieurs cellules de filtrage, la première débutant par une forte inductance; nous pouvons donc admettre que le courant I débité sur les bornes d'utilisation est constant.

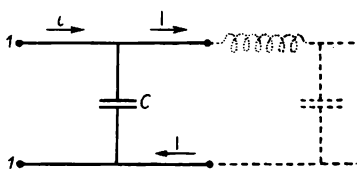


Fig. 49. - Filtrage par capacité pure; schéma.

D'autre part, soit u la tension instantanée du redresseur; le courant total débité par le redresseur est :

$$i = I + C\frac{du}{dt} \cdot$$

De par la nature même du redresseur, on doit avoir $i > 0$, le débit du redresseur n'est donc possible que si :

$$\frac{du}{dt} > -\frac{I}{C} \cdot$$

Graphiquement, si l'on considère deux crêtes successives de la tension redressée (fig.50), le débit du redresseur s'arrête dans l'intervalle séparant le point de contact de la tangente de pente $-I/C$ à chaque crête de tension u et le point de rencontre de cette droite avec la crête suivante. Pendant ce temps, le condensateur assure seul le débit; le redresseur débite pendant les intervalles correspondant aux aires hachurées et la tension résultante a une valeur moyenne d'autant plus grande et une ondulation d'autant plus faible que le rapport I/C est plus faible. A la limite, pour I = 0, le filtrage devient parfait, la tension aux bornes du redresseur est constante et égale à la valeur de crête de u.

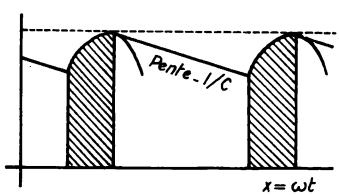


Fig. 50. - Filtrage par capacité pure : diagramme des tensions.

Pour qu'il y ait filtrage par capacité pure, il faut que la construction graphique de la figure 50 soit possible, c'est-à-dire $I > C\left|\frac{du}{dt}\right|$. Au-dessous de cette charge critique, le condensateur d'entrée n'intervient plus dans le filtrage. En considérant des redresseurs de nombre de phases usuels, dont la tension est formée d'une succession de crêtes de sinusoïde d'amplitude V, on trouve aisément les valeurs suivantes pour la charge critique du filtrage par capacité pure. Pour un redresseur d'une seule

alternance $I_k = \omega CV$, ω étant la pulsation du réseau; ceci correspond d'ailleurs au courant de court-circuit I_{cc}, de sorte qu'il n'y a pas d'autre régime possible.

Pour les redresseurs de nombre de phases $p \geqslant 2$, on a $I_k = \omega CV \sin\frac{\pi}{p}$, le filtrage par capacité pure cesse donc d'autant plus tôt son action que le nombre de phases est plus élevé. Au delà de cette valeur, le filtrage n'est plus donné que par les cellules suivantes du filtre; la tension devient alors constante et la charge I_k joue bien le rôle de la charge critique définie plus haut. On voit que le filtrage par capacité pure n'est efficace qu'en dessous de la charge critique. Il implique donc une variation importante de la tension continue moyenne et de l'ondulation en fonction de la charge. Pratiquement, on réserve les filtres à condensateur d'entrée aux redresseurs monophasés à une et deux alternances, travaillant à charge constante.

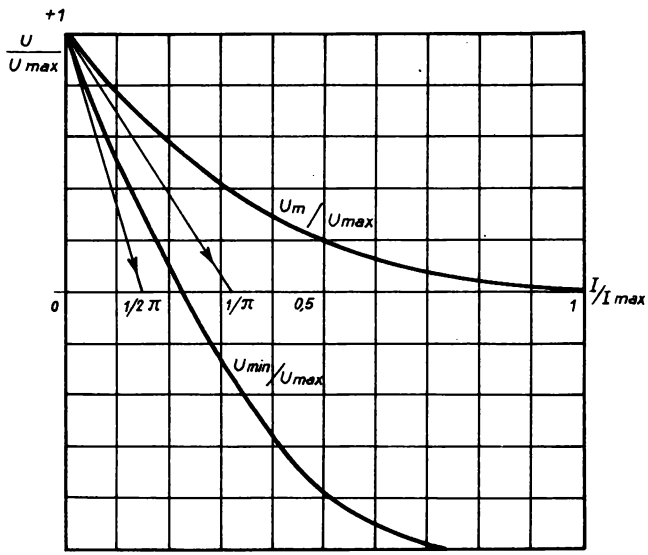


Fig. 51. - Filtrage par capacité pure d'un redresseur monophasé à une alternance.

On peut tracer par le calcul en fonction du rapport $\frac{I_c}{I_{c\,max}}$, les courbes des rapports $\frac{U_{c\,m}}{U_{c\,max}}$ et $\frac{U_{c\,min}}{U_{c\,max}}$, rapports des tensions redressées moyenne et minima à la tension redressée maxima ($U_{c\,max} = V$). Les figures 51 et 52 montrent ces courbes pour des redresseurs monophasés à une et deux alternances; on a de plus $I_k = \omega CV$, cette valeur s'identifiant avec celle du courant de court-circuit dans le cas d'un redresseur à une seule alternance. Ces courbes négligent la résistance interne du redresseur et de son transformateur d'alimentation.

Pour les petites valeurs de I/I_k, c'est-à-dire dans la région où le filtrage par capacité pure est efficace, on peut confondre

les courbes avec leurs tangentes et admettre les formules approchées suivantes :

$$\left.\begin{aligned}\frac{U_m}{U_{max}} &= 1-\pi\frac{I}{I_k}\\ \frac{U_{min}}{U_{max}} &= 1-2\pi\frac{I}{I_k}\end{aligned}\right\}\ \text{pour un redresseur à une alternance}$$

$$\left.\begin{aligned}\frac{U_m}{U_{max}} &= 1-\frac{\pi}{2}\frac{I}{I_k}\\ \frac{U_m}{U_{max}} &= 1-\pi\frac{I}{I_k}\end{aligned}\right\}\ \text{pour un redresseur à deux alternances}$$

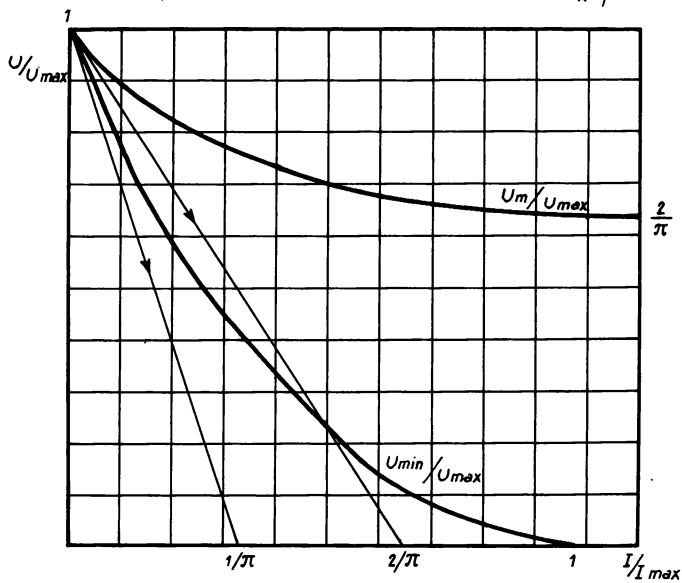


Fig. 52. - Filtrage par capacité pure d'un redresseur monophasé à deux alternances.

Pour traiter complètement le problème du filtrage par capacité pure, il faudrait disposer des développements en série de Fourier des tensions redressées pour diverses valeurs de $\frac{I}{I_{max}}$. Pratiquement, il suffit d'opérer sur le terme fondamental, dont la fréquence est celle du réseau pour le redresseur à une alternance et la fréquence double pour le redresseur à deux alternances; l'amplitude relative peut être prise égale sans grande erreur à :

$$\frac{U_{min} - U_{max}}{2\,U_m}$$

Pour les petites valeurs de $\frac{I}{I_{max}}$, on peut donc admettre les amplitudes relatives :

$$\left.\frac{\pi - \frac{I}{I_k}}{1-\pi\frac{I}{I_k}}\right\}\ \text{pour un redresseur à une alternance}$$

$$\left.\frac{\frac{\pi}{2}\frac{I}{I_k}}{1-\frac{\pi}{2}\cdot\frac{I}{I_k}}\right\}\ \text{pour un redresseur à deux alternances}$$

Ces formules, bien que très simples, donnent des résultats pratiques suffisants.

RÉALISATION PRATIQUE DES FILTRES

La difficulté de réalisation d'un filtre dont les valeurs d'inductance et de capacité ont été déterminées à partir des données précédentes, réside uniquement dans le choix des éléments correspondants, qui présente des particularités sur lesquelles nous devons maintenant insister. Nous étudierons successivement dans ce qui va suivre les condensateurs et bobines d'inductance utilisables dans les filtres à courants redressés.

A) Condensateurs :

Les condensateurs utilisés dans les cellules de filtrage doivent toujours pouvoir supporter en régime permanent la valeur de crête de la tension redressée à vide. En outre, ils doivent pouvoir supporter les surtensions de régime variable, parfois susceptibles de dépasser cette valeur de crête. On n'a généralement pas, sauf dans les filtres à résonance, à s'occuper des pertes et de l'échauffement donnés par les courants d'harmoniques qui les traversent.

Les types de condensateurs utilisables dans les cellules de filtrage sont les suivantes :

1° Condensateurs électrolytiques (ou électrochimiques).- Les condensateurs éléctrolytiques sont constitués par deux armatures d'aluminium très mince, entre lesquelles on dispose un électrolyte convenable. Cet électrolyte peut être, soit libre, soit immobilisé par un papier qu'il imprègne.

Sous l'action de la tension continue appliquée entre les électrodes, il se forme à l'anode un film diélectrique mince pouvant supporter des tensions qui peuvent atteindre quelques centaines de volts. La nature du film diélectrique est controversée : selon les travaux les plus récents, il s'agit d'une couche d'oxygène absorbée sous une couche d'alumine rendue conductrice par imprégnation d'électrolyte. Un condensateur électrolytique présente toujours un courant de fuite, qui ne suit approximativement la loi d'Ohm que si on reste au-dessous des tensions dangereuses : au voisinage de celle-ci, il croît rapidement. Il s'élève également beaucoup si on inverse par mégarde la polarité du condensateur, qui peut en être détérioré.

Les constructeurs de condensateurs électrolytiques indiquent généralement la tension de service et la tension d'essai, qui n'excède souvent pas la première de plus de 10%. Ces limitations sont impératives pour les condensateurs à papier imprégné d'électrolyte dont le claquage est irrémédiable; il en va différemment pour les condensateurs à liquide libre, qui peuvent fort bien être régénérés après claquage, à condition que celui-ci n'ait pas été suivi d'un court-circuit à grand effet destructeur.

Les condensateurs électrolytiques ne peuvent être utilisés que dans certaines limites de températures : certains constructeurs indiquent une limite supérieure de + 70°C. La limite inférieure est fixée par la congélation de l'électrolyte; à ce point de vue, les condensateurs à liquide immobilisé se comportent mieux et permettent d'atteindre - 40° C.

Les tensions de service courantes des condensateurs électrolytiques au papier imprégné s'étagent entre 4 volts (capacité courante 3.000 µF, encombrement 50×35×75 mm.) et 500 volts (capacité courante 8 µF, forme tubulaire, diamètre 25, longueur 70 mm.). Il en existe de beaucoup plus gros : ainsi 2.000 µF 100 volts se logent dans un bac d'accumulateur d'auto. Parmi les condensateurs à liquide libre (devenue introuvables pendant la guerre), un type courant est 16 µF 400 Volts (forme tubulaire, diamètre 30 mm.; hauteur 70 mm).

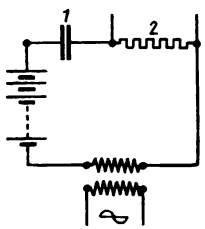


Fig. 53. - Mesure d'une capacité électrolytique.

La mesure de la capacité des condensateurs électrolytiques doit s'effectuer dans les conditions mêmes de leur emploi, c'est-à-dire sous polarisation continue; le schéma de la figure 53 convient parfaitement : la mesure consiste à comparer la tension aux bornes du condensateur 1 avec celle aux bornes d'une résistance connue 2, à l'aide d'un voltmètre amplificateur (avec condensateur d'entrée filtrant la composante continue), ou mieux encore à l'aide d'un oscillographe cathodique. Il est également intéressant de mesurer le courant de fuite d'un tel condensateur sous sa tension continue de service.

2° Condensateurs au papier huilé ou paraffiné. - Ces condensateurs sont formés de deux bandes d'aluminium très minces, enroulées avec interposition de papier imprégné d'huile ou de paraffine.

Leurs tensions de service atteignent facilement des dizaines de kV. La résistance d'isolement est excellente et le courant de fuite généralement négligeable. Toutefois, ceci ne reste vrai que pour des condensateurs à boitier étanche; les autres s'imprègnent souvent d'humidité qui compromet leur isolement. Un bon condensateur de ce type reste très longtemps chargé à circuit ouvert; même déchargé par court-circuit temporaire, il reprend une charge résiduelle, suffisamment grande avec des tensions de quelques kV pour être dangereuse. Le mieux est donc de shunter toujours les batteries importantes, utilisées à tension élevée, par une résistance de fuite déchargeant les condensateurs dans une durée suffisamment courte.

Les tensions de claquage sont toujours dans un rapport assez grand (coefficient de sécurité) avec les tensions de service. Les coefficients de sécurité adoptés varient avec les constructeurs.

Il n'y a pas de difficulté à l'emploi de ce type de condensateurs aux basses températures.

La mesure de leur capacité ne présente rien de particulier.

Inductances :

Les inductances employées dans les cellules de filtrage peuvent être, soit des inductances dans l'air, soit des inductances à noyau ferromagnétique.

1° Inductances dans l'air. - Les inductances dans l'air présentent l'avantage d'une valeur bien définie et constante, même en surcharge. Par contre, elles sont plus coûteuses que les inductances à noyau ferromagnétique; aussi sont-elles peu employées, sauf dans des cas spéciaux.

On adopte alors pour le bobinage la forme du tore à section carrée donnant l'inductance maximum (fig. 54), dans lequel on a : r = 1,85 a.

L'inductance de la bobine est alors :

$L = 35{,}3\ N^2 a.10^{-9}$ henry, N étant le nombre de spires.

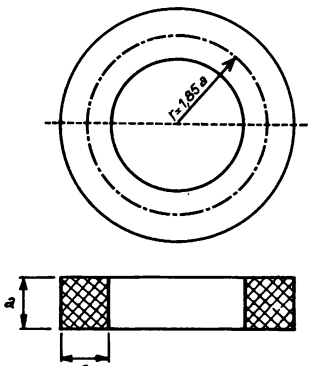


Fig. 54. - Forme optima d'une bobine d'inductance sans fer.

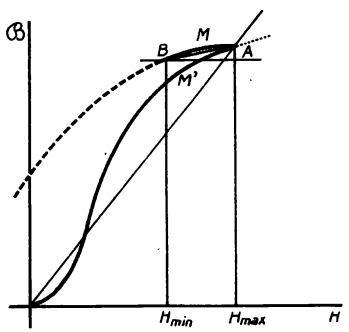


Fig. 55. - Cycle d'hystérésis d'un noyau d'inductance de filtrage.

2° Inductances à noyau ferromagnétique. - Le circuit magnétique de ces bobines travaille dans des conditions très différentes des conditions usuelles; il est en effet le siège d'un flux continu, auquel vient se superposer un flux alternatif de faible amplitude par rapport au premier.

Considérons (fig. 55) la courbe de première aimantation du matériau considéré et supposons que nous la décrivions de l'origine au point A, correspondant au champ H_{max} ; faisons décroître le champ de H_{max} à H_{min} : le point représentant l'état magnétique décrira l'air AMB qui fait partie du cycle d'hystérésis normal décrit entre + H_{max} et - H_{min} dont une portion est représentée en pointillé sur la figure 8. Si nous faisons croître à nouveau le champ de H_{min} à H_{max}, le point figuratif décrira un arc voisin de AB, qui l'amènera en un point voisin de A. Au bout d'un certain nombre de variations identiques, le point figuratif décrira un cycle limite voisin de AMBM'A de la figure 55. On voit que ce cycle présente une pente moyenne voisine de celle de la branche supérieure du cycle normal au voisinage du sommet, donc bien inférieure à celle de la courbe d'aimantation. Cette pente mesure, en somme la perméabilité au champ magnétique alternatif d'amplitude $1/2\ (H_{max} - H_{min})$, superposé au champ continu $1/2\ (H_{max} + H_{min})$.

Cette perméabilité μ est donc très inférieure à celle qui correspond à la droite OA ou à la perméabilité moyenne pour le cycle $(-H_{max} + H_{max})$.

Elle croît évidemment avec le rapport de l'amplitude du champ alternatif à celle du champ continu. On peut la mesurer pour une nature de tôles déterminée. La figure 56 montre la famille des courbes de μ en fonction de l'induction moyenne, pour diverses valeurs du rapport $x = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max} + H_{min}}$ pour de la tôle au silicium correspondant à des pertes totales de 1,6 w par kg. à 10.000 gauss d'induction alternative de fréquence 50. La figure 57 montre pour ce même matériau la courbe d'aimantation pour la composante continue (champ moyen mesuré en ampères-tours/cm) en fonction de l'induction moyenne.

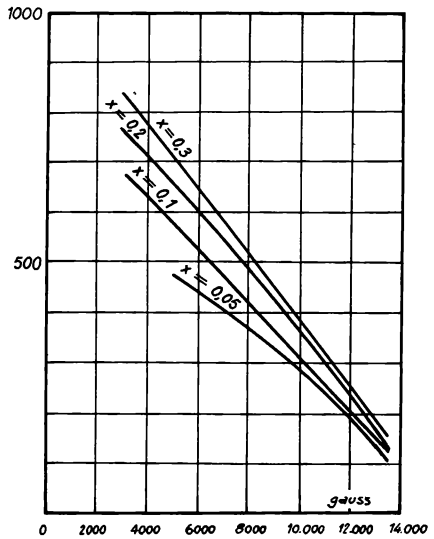


Fig. 56. - Tôles au silicium 1,6 w/kg. : perméabilité alternative en fonction de l'inductance moyenne pour diverses valeurs de : $x = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max} + H_{min}}$

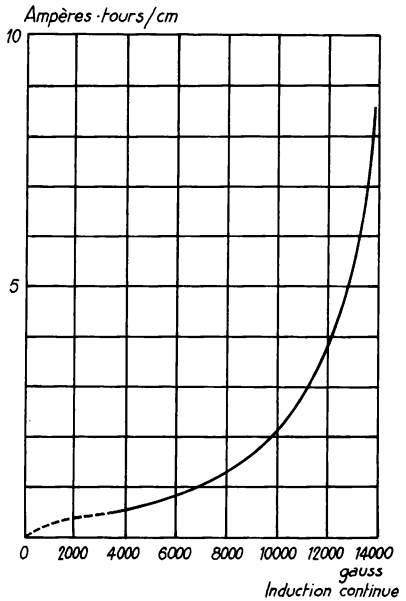


Fig. 57. - Tôles au Silicium 1,6 w/kg. : champ moyen en fonction de l'induction moyenne.

Considérons maintenant une bobine d'inductance, formée d'un circuit magnétique de section S, avec entrefer d'épaisseur e, la ligne de force moyenne dans le fer étant l, et d'un bobinage de n spires, parcouru par un courant ondulé de valeur moyenne I. Soit B l'induction moyenne dans le fer; elle est kB dans l'entrefer, k étant le coefficient d'utilisation des tôles (voisin de 0,9); soit A le nombre d'ampères-tours absorbés par cm. de fer. L'équation des ampères-tours s'écrit :

$$n\,I = 0{,}8\ kBe + lA.$$

D'autre part, le bobinage présente vis-à-vis de la composante alternative du courant ondulé l'inductance :

$$L = \frac{4\pi n^2 S}{e + \frac{l}{k\mu}} \cdot 10^{-9}\ \text{henry} = \frac{4\pi n^2 k S \cdot 10^{-9}}{l} \cdot \frac{I}{\frac{I}{\mu} + \frac{\frac{nI}{l} - A}{0{,}8\,B}} \qquad (15)$$

Pour un circuit magnétique déterminé, le premier facteur est constant; dans le second, on peut, avec une approximation suffisante, admettre que μ ne dépend que de B. Dans ces conditions, on peut rechercher la valeur optima de B qui rend minimum le dénominateur du second terme pour une valeur constante de $\frac{n\,I}{l}$. C'est en l'adoptant qu'on tirera le meilleur parti du circuit magnétique, L ayant alors sa valeur maximum. La figure 58 montre pour les mêmes tôles que les figures 56 et 57 la courbe de la valeur de B_{opt} et du rapport $\frac{e}{l}$, ces deux grandeurs étant exprimées en fonction de $\frac{nI}{l}$.

Etant donné un circuit magnétique sur lequel on veut réaliser une inductance L pour un courant moyen I, on se donne successivement plusieurs valeurs du nombre inconnu de spires n. On en déduit n I, d'où l'induction optima B à l'aide de la figure 58 et enfin L à l'aide de la formule (15). On déduit la valeur exacte de n par interpolation entre les deux valeurs encadrant la valeur cherchée de L. Il reste à déterminer la section du fil de manière à obtenir un échauffement acceptable des bobines. Dans ce calcul, on peut négliger l'échauffement du fer.

Pratiquement, on trouve qu'on peut loger sur un circuit magnétique déterminé une puissance $\omega L I^2$ ($\omega = 314$) sensiblement égale à celle qu'on pourrait y loger sous forme de transformateur à double enroulement (ne pas oublier qu'un transformateur dit de 1 kVA renferme en réalité 2 k VA de bobinages).

Pendant longtemps, certains constructeurs français donnaient, pour les valeurs d'inductance de filtrage à noyau de fer de petite dimension, des chiffres fantaisistes; la situation s'est améliorée, mais il est toujours bon de mesurer exactement les inductances dans les conditions de l'emploi : pour cela, on emploie le montage de la figure 59 dans lequel on compare la tension alternative aux

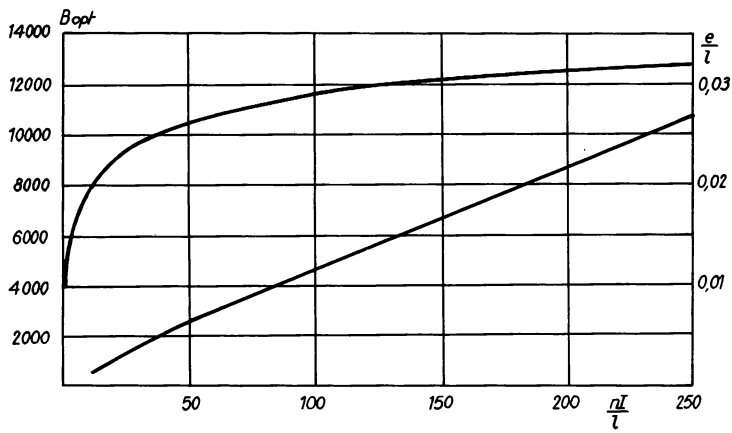


Fig. 58. - Courbes de l'induction optima B_{opt} et du rapport entrefer/ligne de force moyenne en fonction des ampères tours/cm., pour des inductances avec entrefer et tôles au Silicium 1,6 w/kg.

bornes de l'inductance 1 avec celle aux bornes de la résistance connue 2, les mesures se faisant, soit au voltmétre amplificateur, soit à l'oscillographe cathodique. On trouvera toujours ainsi des valeurs très inférieures à celle de l'inductance en alternatif pur.

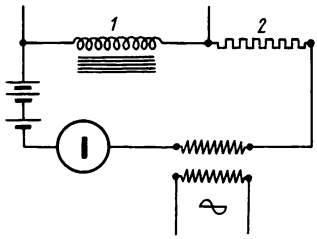


Fig. 59. - Mesure d'une inductance de filtrage à noyau ferromagnétique.

EXEMPLES DE FILTRES A COURANTS REDRESSÉS

1° Filtre à charge peu variable. - Nous prendrons pour exemple le filtre à une cellule qu'on rencontre dans les radio-récepteurs. Il est constitué par une inductance à noyau de fer (qui est le plus souvent l'inducteur du haut parleur électrodynamique), pour laquelle on peut admettre L = 20 henrys, et un condensateur électrolytique de capacité C = 16 µF. Cette cellule est, en général, complétée par un condensateur d'entrée, placé en amont de l'inductance, et qui sert surtout à remonter la tension moyenne, tout en renforçant un peu le filtrage.

Calculons les performances de la cellule LC : sa pulsation propre est

$$\Omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{I}{\sqrt{320 \cdot 10^{-6}}} = 56$$

correspondant à une fréquence propre 8,9.

Les redresseurs utilisés sont à deux alternances, leur premier harmonique pour un réseau à fréquence 50 a une fréquence égale à 100, ce qui fournit un rapport d'étouffement.

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{628}{56}\right)^2 - 1 = 125 \quad .$$

Si on néglige le condensateur d'entrée, on a une amplitude initiale d'harmonique 100 égale à 66%; le taux résiduel sera donc $\frac{66}{125} = 0,53\%$. Si le condensateur d'entrée abaisse de moitié l'amplitude de l'ondulation, on a pour le taux résiduel à fréquence 100 : 0,25% environ.

Examinons maintenant l'influence d'une modulation de la charge à très basse fréquence (25 périodes par seconde, par

exemple); la tension redressée moyenne étant supposée de 250 volts et la charge 50 mA, d'où le degré d'amortissement :

$$2a = \frac{I}{U_c}\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{0,05}{50}\sqrt{\frac{20}{16 \cdot 10^6}} = 0,224 .$$

Supposons que le taux de modulation de la charge soit $\frac{I}{I_c}$; celui de la tension à la sortie du filtre sera, comme nous l'avons vu :

$$\frac{u}{U_c} = 2a \frac{\frac{\omega}{\Omega}}{\frac{\omega^2}{\Omega^2} - 1} \frac{I}{I_c} = 0,224 \frac{\frac{25}{8,9}}{\left(\frac{25}{8,9}\right)^2 - 1} \frac{I}{I_c} = 0,09 \frac{I}{I_c}$$

Un taux de modulation de 10% de la charge donnerait donc ici une ondulation supplémentaire, à fréquence 25, de la tension à la sortie du filtre, dont le taux serait : 0,009 = 0,9%, supérieure à celle provenant du redressement; il est donc fort heureux que les charges anodiques des radio-récepteurs soient peu modulées.

2° Filtre à charge très variable. - Soit à filtrer la tension d'un redresseur hexaphasé 30 kW - 12 kV, alimenté par un réseau à fréquence 50, dans les conditions suivantes : taux d'ondulation résiduelle : 0,5/1.000 sur la plus basse fréquence provenant du réseau; une modulation de la charge à la fréquence 25 de 80% devra donner seulement 0,5% d'ondulation supplémentaire sur la tension à la sortie du filtre. Ce sont des conditions analogues à celles que demande un émetteur radiophonique.

La plus basse fréquence provenant du réseau a pour valeur 100; nous admettons un rapport de 5% entre la composante inverse et la composante directe. Dans ces conditions, l'amplitude relative de l'ondulation à fréquence 100 a pour valeur 0,05. Il nous faudra donc un rapport d'étouffement :

$$\varepsilon_0 = \frac{0,0005}{0,05} = 100 \text{ pour la pulsation } \omega = 628 ,$$

d'où

$$LC = \frac{1}{\Omega^2} = \frac{\varepsilon_0^2 + 1}{\omega^2} = \frac{101}{628^2} = 256 \cdot 10^{-6}, \quad \Omega = 62,5 .$$

Calculons, d'autre part, le degré d'amortissement a : à la fréquence 25 ($\omega = 157$) nous devons appliquer l'équation (9) qui fournit :

$$2a = \frac{u}{Uc} \frac{\frac{\omega^2}{\Omega^2} - 1}{\frac{\omega}{\Omega}} \frac{I}{I_c} .$$

or, on a sensiblement : $\frac{\omega}{\Omega} = 2,5$, d'où :

$$2a = \frac{0,5}{80} \frac{5,25}{25} = 0,0131 .$$

C'est là une valeur faible, qui pourrait nous donner une charge critique excessive. Calculons donc celle-ci, qui est donnée par la formule :

$$\frac{I_k}{I_c} = \frac{U}{U_c} \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\omega}{\Omega} \frac{1}{2a} .$$

Ici, nous devons calculer sur le principal harmonique de la tension redressée, dont la fréquence est 300, la pulsation $\omega = 1884$ et l'amplitude relative $U_c = 0,057$, d'où $\frac{\omega}{\Omega} = \frac{1884}{62,5} = 30$; l'étouffement est $\varepsilon_0 = 30^2 - 1 = 900$.

Finalement $\frac{I_k}{I_c} = 0,057 \cdot \frac{30}{900} \cdot \frac{1}{0,0131} = 0,145$.

Avec le taux de modulation admis, le courant redressé ne descend pas au-dessous de 0,2 de la pleine charge, donc reste au-dessus de la valeur critique. S'il en était autrement, il faudrait recourir, comme nous l'avons vu, a un filtre a deux cellules, la première a grand amortissement, la seconde a amortissement faible.

Terminons le calcul des éléments du filtre. Nous avons $I_c = \frac{30\ kW}{12\ kV} = 2,5$ A; d'où, pour la valeur de la résistance de la charge : $R = \frac{12.000}{2,5} = 4.800$ ohms.

Le degré d'amortissement a pour valeur :

$$2a = 0,0131 = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{10^3}{4800}\sqrt{\frac{L}{C}},$$

C étant exprimé en microfarads, d'où : $\frac{L}{C} = (0,0131 \times 4,8)^2 = 39,6 \times 10^{-4}$.

D'autre part, $L\,C = 256$, d'où $L = \sqrt{256 \times 39,6 \times 10^{-4}} = 1$ henry environ et C = 256 microfarads.

L'inductance en question aura une puissance équivalente à 50 périodes de :

$$\omega L I^2 = 314 \cdot I \cdot 2,5^2 = 1,96\ kVA.$$

Elle peut être logée, par conséquent, sur une carcasse de transformateur de 2 kVA environ.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages fondamentaux

H. GIROZ : Commutatrices et Redresseurs, Collection A. Colin.

D. C. PRINCE et H. A. VODGES : Principles of Mercury Rectifiers and their Circuits, M. Graw Hill Book Company, New-York.

H. RISSIK : Fundamental Theory of Arc Converters. Chapmann and Hill, London.

Périodiques

Revue Générale d'Electricité, Paris.

General Electric Review, New York.

DIXIÈME CHAPITRE

TECHNIQUE DES CIRCUITS ÉLECTRIQUES ET DES TUBES A VIDE

par

R. HUCHET

Ingénieur E. S. E.
Ingénieur de Recherches à l'O.N.E.R.A.

TECHNIQUE DES CIRCUITS ÉLECTRIQUES ET DES TUBES A VIDE

GENERALITES 535
Spectres des signaux 536
Bandes de fréquences à transmettre 548
Qualités requises pour un transmetteur 551

REPONSE DES CIRCUITS, BANDE DE FREQUENCES TRANSMISE 552
Sélectivité, bande passante 552
Constante de temps d'un circuit 553
Réponse des circuits RC simples 554
Circuit à bande passante étroite 559
Circuits à large bande 568
Principe de dualité 573

LES TUBES A VIDE 574
Les diodes 575
Les tubes amplificateurs 586
Les tubes multigrilles 604
Réaction, contre-réaction 611
Les générateurs d'ondes sinusoïdales 616
Montages divers 628
Limites dans l'emploi des tubes 630
Utilisation des tubes en tout ou rien 636
Amplification HF de puissance 644
Amplification des signaux lentement variables 650

DONNEES CONCERNANT LA REALISATION 657
Remarques générales d'ordre pratique 657
Les éléments RLC 659
Réalisation et mise au point 664

TECHNIQUE DES CIRCUITS ÉLECTRIQUES ET DES TUBES A VIDE

GÉNÉRALITÉS

L'information issue d'un détecteur quelconque est rarement utilisée à l'état brut.

Entre détecteur et appareil de lecture, on est souvent amené à insérer des ensembles plus ou moins complexes destinés, soit à amplifier, soit à transformer le signal primitif.

Les éléments de base de la chaîne de transmission ainsi introduite sont d'une part les tubes à vide et d'autre part, les circuits R L C qui leur sont toujours associés.

Les problèmes techniques qui se posent dans la réalisation d'une telle chaîne dépendent de la forme du signal, des transformations que l'on veut ou ne veut pas qu'il subisse, et, dans certains cas, du rôle final que l'on désire lui voir assumer. Le signal, pouvant aller du courant lentement variable aux impulsions de courte durée, occupe un domaine de fréquence très différent selon le cas, suivant le but poursuivi, on est alors conduit à transmettre une fraction plus ou moins importante de cette bande; c'est ainsi qu'apparaît comme une donnée fondamentale du problème la bande de fréquences à transmettre.

Un circuit quelqu'il soit ne transmettant qu'un domaine déterminé de fréquences, le choix des circuits propres à transmettre la bande voulue - c'est-à-dire à transmettre sans déformation appréciable, ou au contraire à transformer suivant une loi déterminée le signal - en découle, ainsi que leur mode de réalisation et leur qualité.

Enfin, les tubes que l'on est amené à introduire dans la chaîne à des fins d'amplification ou de séparation entre circuits, possèdent certaines caractéristiques propres qui viennent toujours modifier plus ou moins profondément celles des circuits qui leur sont associés.

Il apparaît finalement que c'est l'ensemble signal-circuits-tubes qu'il faut considérer comme un tout et traiter comme tel. On ne peut dissocier cet ensemble, sans être conduit à des non-sens.

Des questions comme le gain, la bande passante, le temps de réponse, le bruit de fond... sont intimement liées; on ne peut tenter de modifier l'une sans altérer les autres.

C'est sous cet angle que le problème a été envisagé ici pour quelques ensembles simples et particulièrement courants, en signalant ce que l'on peut en attendre et les difficultés que l'on peut y rencontrer. La solution à apporter à un problème particulier dont les données sont bien définies est alors une question d'imagination.

Enfin, s'il est exact qu'une telle technique réussit là où d'autres s'avèrent impuissantes, il est bon d'être prévenu de ses limites propres et des servitudes qu'elle entraîne. Elles sont, dans la mesure du possible, signalées au passage. De même, on s'est efforcé pour plus de généralité, d'indiquer dans chaque cas, comment on parvenait aux diverses relations utilisées.

On s'est limité au domaine des circuits à constantes localisées et des tubes conventionnels.

SPECTRES DES SIGNAUX

L'onde harmonique est le "signal" le plus simple que l'on puisse concevoir.

Mathématiquement, un signal $\varphi(t) = A\cos 2\pi f_o t$ est tel que pour t variant depuis $t = -\infty$ jusqu'à $t = +\infty$ A est constante. Du point de vue physique un signal ainsi conçu n'a pas de sens, A prend entre $-\infty$ et $+\infty$ au moins deux valeurs distinctes $A \neq 0$ dans un intervalle t_1, t_2 plus ou moins long, mais toujours fini, $A = 0$ en dehors de cet intervalle. L'onde harmonique pure apparaît donc comme un cas limite théorique n'ayant pas de réalité physique. Pour que l'on puisse parler de signal, il faut que l'onde soit porteuse d'une information, c'est-à-dire qu'elle soit modulée par le message à transmettre. La modulation peut d'ailleurs affecter une caractéristique de l'onde, autre que l'amplitude, c'est-à-dire sa fréquence ou sa phase. A partir de ce moment, le signal n'occupe plus dans le domaine des fréquences une simple raie à f_o (f_o pouvant être la fréquence zéro), comme dans le cas limite; il occupe autour de cette fréquence une certaine bande.

Cette bande constitue son spectre, chacune des raies représentant l'amplitude du signal harmonique théorique correspondant qui superposé à toutes les autres composantes définies de la même façon - c'est-à-dire pour toutes les valeurs de t - redonne dans l'intervalle t_1, t_2 et seulement dans t_1, t_2 le signal réel. Tout système physique devant transmettre l'information dont est porteur le signal devrait pouvoir transmettre la bande intégralement et sans distorsion, c'est-à-dire sans affecter ni l'amplitude ni la phase relative de chaque composante.

Tout système transmetteur apporte en fait une distorsion, ses qualités de transmission n'étant pas les mêmes à toutes fréquences, non plus que la vitesse à laquelle il transmet; amplitude et phase seront donc pous chaque composante plus ou moins

altérées. Ces distorsions devront être suffisamment faibles pour que pratiquement le signal reste intelligible. Les distorsions que l'on tolérera dans une transmission seront alors fonction du but poursuivi. La décomposition d'un signal quelconque en une somme de signaux harmoniques apparaît comme un moyen commode d'analyse des systèmes transmetteurs. Les fonctions sin. et cos. étant d'un maniement facile, on pourra, en effet, aisément connaître a priori la courbe de réponse d'un système donné et savoir s'il est apte à transmettre le signal envisagé dont on aura préalablement déterminé le spectre.

Le premier problème est donc de savoir quel est l'encombrement du signal à transmettre dans le domaine des fréquences.

Spectres des signaux périodiques élémentaires

Pour un signal périodique de période T, le problème revient à chercher le développement en série de Fourier. On écrira le signal sous la forme $\left(\omega_o=\frac{2\pi}{T}\right)$:

$$\varphi(t)=\sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos\left[n\omega_o t+\Phi_n\right]$$

A_n et Φ_n étant respectivement l'amplitude et la phase de l'harmonique de rang n. La composante A_o est la valeur moyenne du signal

$$A_o=\frac{1}{T}\int_o^T \varphi(t)\,dt$$

les signaux élémentaires que l'on rencontre le plus souvent dans la pratique sont indiqués plus loin avec leur spectre de fréquences $A_n(f)$ ou spectre des amplitudes, le diagramme ainsi obtenu représente pour chaque composante l'amplitude de l'harmonique correspondant. En traçant le diagramme $A_n^2(f)$ on obtiendrait le spectre d'énergie de $\varphi(t)$. La valeur efficace de $\varphi(t)$ soit :

$$A_{eff}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_o^T \varphi^2(t)\,dt}$$

utile pour les calculs d'énergie a été indiquée.

Dans tout ce qui suit on a posé :

τ_o = durée du signal

T = période de récurrence

et $k=\frac{\tau_o}{T}$ $\alpha=\pi\frac{\tau_o}{T}$ $\omega_o=\frac{2\pi}{T}$

Notons les deux remarques suivantes qui peuvent rendre des services en évitant des calculs parfois longs :

- Le développement de la fonction intégrale de $\varphi(t)$ est égal à l'intégrale du développement de $\varphi(t)$

- Par contre, le développement de la fonction dérivée de φ (t) n'est égal à la dérivée du développement de φ (t) que si cette dernière est une série convergente.

Remarquons enfin que le spectre d'un signal périodique est - d'après l'expression de φ (t) - un spectre discret (discontinu) ne comportant que des raies isolées les unes des autres. Au contraire, un signal isolé possède un spectre continu.

1. - Impulsions rectangulaires. (Planche 1)

Les impulsions prennent une importance de plus en plus grande en Physique; elles permettent de mettre en oeuvre des énergies considérables pendant des temps très courts donnant ainsi la possibilité de réaliser des conditions impossibles en régime permanent.

Avec les notations posées, on a :

$$\varphi(t) = A\,k\left[1+2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin n\alpha}{n\alpha}\cos\, n\omega_o t\right]$$

$$A_{eff} = A\sqrt{k}$$

Les raies sont séparées par $\frac{1}{T}$, celles correspondant aux fréquences multiples de $\frac{1}{\tau_o}$ sont d'amplitude nulle. L'enveloppe du spectre est la courbe

$$y = 2Ak\,\frac{\sin x}{x} \qquad x = \pi\tau_o f$$

où f varie d'une façon continue. Les extrema de y correspondent aux racines de $x = tg.x$ ($x = 4,49$; $7,72$; $10,90$; $14,07$; $17,22$; $20,37$ ...) les zéros à $x = m\pi$ (m entier).

Il y a opposition de phase entre deux harmoniques situés dans deux lobes adjacents. Chaque foliole du spectre comprend $\frac{1}{k}$ raies. La foliole centrale correspond à une bande de fréquences $\Delta f = \frac{1}{\tau_o}$

Le spectre d'énergie est - à un facteur constant près - déterminé par la courbe $\left[\frac{\sin x}{x}\right]^2$. La fraction d'énergie totale contenue dans la première foliole est :

$$\eta = \frac{I_{a=\pi}}{I_{a\infty}} \quad \text{avec } I_a = \int_o^a \left[\frac{\sin x}{x}\right]^2 dx = \left[\frac{\cos 2x - 1}{2x}\right]_o^a + \int_o^a \frac{\sin 2x}{2x}\,d2x$$

$$\frac{I_\pi}{I_\infty} = \frac{1,42}{1,57} = 0,90$$

Le même calcul appliqué aux deux premières folioles, c'est-à-dire à la bande de fréquences $\frac{2}{\tau_o}$ donne $\eta = 0,95$. Pour la bande $\frac{3}{\tau_o}$, $\eta = 0,97$.

Ainsi, 90% de l'énergie totale contenue dans le spectre, - c'est-à-dire dans le signal - se trouvent concentrés dans la bande

$$\Delta f = \frac{1}{\tau_o}$$

Ce résultat est particulièrement intéressant et montre que si l'on ne s'intéresse qu'à des questions d'énergie, cette bande est suffisante pour transmettre le signal avec un rendement très acceptable. Le problème est différent si l'on s'attache à la forme de l'onde.

Pour des impulsions de durée $\tau_o = 1\ \mu s$, c'est donc une bande $\Delta f = 1$ Mc/s qu'il faut transmettre, la transmission d'une bande triple pourrait conduire à des difficultés que ne justifie pas toujours l'accroissement de η.

2. - Impulsions carrées. (Planche 1)

C'est un cas particulier du précédent ($k = 1/2$, $\alpha = \pi/2$)

$$\varphi(t) = \frac{A}{2}\left[1 + \frac{4}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^n}{2n+1}\cos(2n+1)\,\omega_o t\right]$$

$$A_{eff} = \frac{A}{\sqrt{2}}$$

Le spectre ne comporte pas d'harmoniques pairs[1] cette remarque peut être utilisée lors de la mise au point d'un dispositif devant délivrer les signaux carrés : à l'aide d'un circuit sélectif, on prélève l'harmonique $f = 2/T$, le résultat cherché est obtenu lorsque, par réglage des circuits, on a annulé son amplitude.

Seuls restent les harmoniques impairs, ils varient en amplitude comme $1/(2 + 1)$, c'est-à-dire $1/f$.

3. - Impulsions triangulaires isocèles. (Planche 1)

Un faisceau lumineux réfléchi par un miroir tournant et tombant sur une cellule donne lieu à des impulsions proches de ce type. De même les impulsions de courte durée ($\tau_o < 10^{-6}$ s) sont pratiquement de ce type. On a :

$$\varphi(t) = \frac{A\,k}{2}\left[1 + \frac{8}{\alpha^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}\sin^2\frac{n\alpha}{2}.\cos\ n\,\omega_o t\right]$$

$$A_{eff} = A\sqrt{\frac{k}{3}}$$

Les raies sont séparées par l'intervalle de fréquences $1/T$; les raies à $2\,p/\tau_o$ (p entier) sont d'amplitude nulle. L'enveloppe du spectre est $y = k\,A\,.\left[\frac{\sin x}{x}\right]^2$ avec $x = \frac{\pi\,\tau_o\,f}{2}$ où f varie continuement. C'est la même enveloppe que pour l'impulsion rectangulaire, mais la pseudo-période est double, le premier

(1) D'une façon générale tout signal périodique $\varphi(t) = \varphi_{max} + \psi(t)$ tel que $\psi(t + T) = -\psi(t)$ possède un spectre ne contenant que des harmoniques impairs.

lobe est donc d'encombrement double. Ici, tous les harmoniques sont en phase. Il est intéressant de remarquer que les harmoniques du premier lobe ont une amplitude variant moins rapidement de l'un à l'autre que pour les impulsions rectangulaires. Ce type d'impulsion est donc plus approprié à la production d'harmoniques de même amplitude. Enfin, dans le cas où les deux impulsions rectangulaires et triangulaires ont la même aire, donc correspondant à une même énergie, à amplitude égale, la triangulaire sera de durée double, ce qui est intéressant si on songe aux difficultés rencontrées dans la production des impulsions de courte durée. Par ailleurs, dans ce cas, la concentration de l'énergie dans le premier lobe d'encombrement $\Delta f = 2/2\tau_o = 1/\tau_o$ (le même que pour le rectangle) est meilleure que pour le rectangle.

4. - Impulsions en dents de scie isocèles. (Planche 1)

C'est un cas particulier du précédent ($k = 1$, $\alpha = \pi$). Ces impulsions correspondent à l'intégration d'impulsions carrées; on peut les obtenir facilement à partir de ces dernières.

$$\varphi(t) = \frac{A}{2}\left[1 + \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\cos(2n+1)\,\omega_o t\right]$$

$$A_{eff} = \frac{A}{\sqrt{3}}$$

Les harmoniques pairs n'existent pas, l'amplitude des impairs varie comme $1/(2n+1)^2$ donc comme $1/f^2$.

On peut vérifier ici la remarque faite au début sur l'intégration.

5. - Dents de scie (Planche 1)

C'est la forme des signaux de balayage d'oscillographes, la partie de grande pente correspondant au retour de spot. (Pl. 1-a) L'intégration des signaux rectangulaires donne lieu à des impulsions de ce type :

$$\varphi(t) = \frac{A}{2}\left[1 + \frac{2}{\pi(1-k)}\,\frac{\sin\alpha}{\alpha}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}\cos\cdot n\,\omega_o t\right]$$

$$A_{eff} = \frac{A}{\sqrt{3}}$$

Le spectre est riche en harmoniques, dans les oscillographes où A peut atteindre quelques centaines de volts; il convient de se méfier du rayonnement de la base de temps qui peut perturber certains appareils de mesure sensibles situés à proximité.

Cas particulier $k = 1$; $\alpha = \pi$. (Pl. 1-b).

C'est la forme théorique du signal de balayage (temps de retour nul). Pratiquement, les signaux dont le temps de retour est faible vis-à-vis du temps de montée peuvent lui être assimilés :

$$\varphi(t)=\frac{A}{2}\left[1+\frac{2}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^{n+1}}{n}\sin\, n\omega_o t\right]$$

$$A_{eff}=\frac{A}{\sqrt{3}}$$

Les harmoniques varient comme 1/n, les harmoniques pairs et impairs sont en opposition de phase.

6. - Impulsions en dents de scie. (Planche 1)

Cette forme d'onde correspond pratiquement, à une symétrie près, à la partie positive du signal carré différencié c'est-à-dire à un signal carré différencié puis écrêté par cut-off.

$$\varphi(t)=A\frac{k}{2}\left\{1+\frac{2}{k\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}\left[\left(\frac{\sin n\alpha}{n\alpha}\right)^2+2\,\frac{\sin 2n\alpha}{2n\alpha}+1\right]^{\frac{1}{2}}\cos n\omega_o t\right\}$$

$$A_{eff}=A\sqrt{\frac{k}{3}}$$

L'enveloppe du spectre n'a pas de zéro.

Si α est petit

$$\varphi(t)=A\frac{k}{2}\left[1+\frac{2}{k\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}\left(\frac{\sin n\alpha}{n\alpha}-1\right)\cos n\omega_o t\right]$$

7. - Impulsions trapézoïdales. (Planche 1)

Cette forme se rencontre dans le cas d'un faisceau lumineux, modulé par disque tournant

$$k=\frac{\tau_o}{T}\qquad \alpha=\pi\frac{\tau_o}{T}\qquad q=\frac{\tau_1}{\tau_o}\qquad \omega_o=\frac{2\pi}{T}$$

$$\varphi(t)=\frac{k}{2}\,(1+q)\,A\left[1+\frac{4}{\alpha^2(1-q^2)}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\cos nq\alpha-\cos n\alpha}{n^2}\cos n\omega_o t\right]$$

Si $q\longrightarrow o$ comme $1-\cos n\alpha=2\sin^2\frac{n\alpha}{2}$, on retrouve le spectre des impulsions triangulaires isocèles.

Si $q\longrightarrow 1$, en remarquant que

$$\frac{\cos nq\alpha-\cos n\alpha}{1-q^2}=-n\alpha\,\frac{\sin\cdot\frac{n\alpha(q+1)}{2}}{1+q}\cdot\frac{\sin\cdot\frac{n\alpha(q-1)}{2}}{\frac{n\alpha}{2}(1-q)}$$

tend vers $\frac{n\alpha}{2}\sin n\alpha$, on retrouve le spectre des impulsions rectangulaires.

8. - Impulsions en arcs de sinusoïde. (Planche 1)

Ce type d'impulsions est particulièrement important (Pl. 1 - c) On le rencontre dans un grand nombre d'applications (redressement, amplificateur de puissance, multiplicateur de fréquence...)

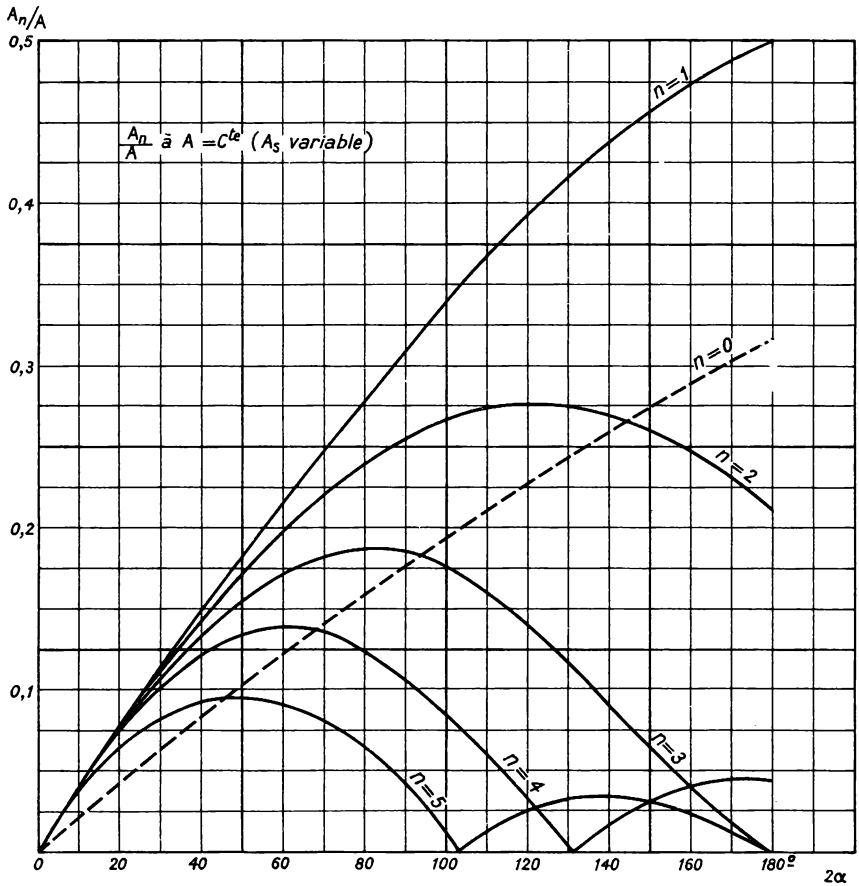


Fig. 1. - Harmoniques dans les impulsions en arcs de sinusoïde.

La composante moyenne a pour valeur :

$$A_o = \frac{A}{\pi}\ \frac{\sin\alpha - \alpha\cos\alpha}{1-\cos\alpha}$$

L'amplitude de l'harmonique de rang n est :

$$A_n = \frac{A}{\pi n(1-\cos\alpha)}\left[\frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} - \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1}\right]$$

Enfin, la valeur efficace a pour expression :

$$A_{eff} = \frac{A}{1 - \cos \alpha} \left\{ \frac{1}{2\pi} \left[\alpha \left(2 + \cos 2\alpha \right) - \frac{3}{2} \sin 2\alpha \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

L'angle 2α est appelé angle d'ouverture. ($2\alpha = 2\pi \frac{\tau_o}{T}$)

Si A_s est l'amplitude de la sinusoïde génératrice, on a $A = A_s (1 - \cos\alpha)$

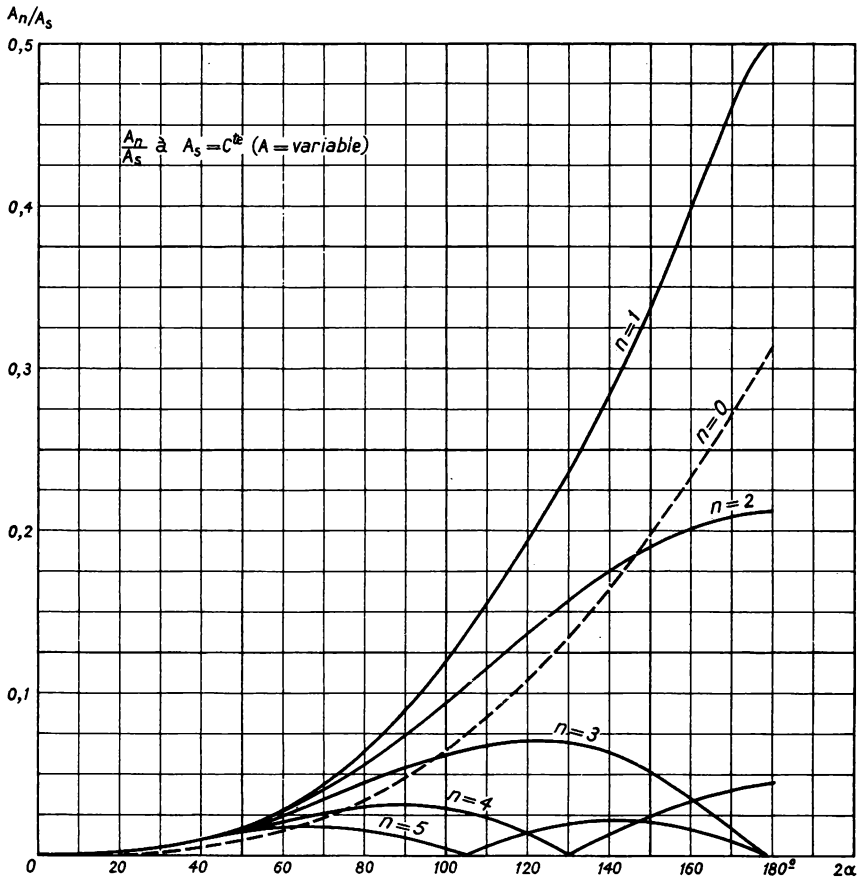
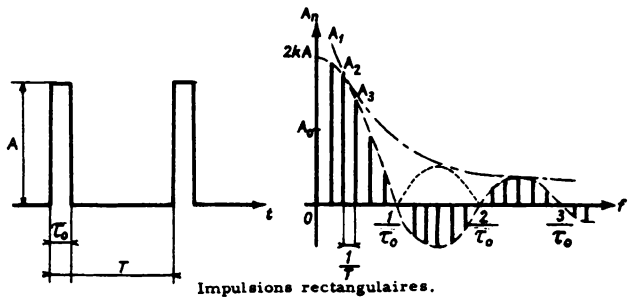


Fig. 2. - Harmoniques dans les impulsions en arcs de sinusoïde.

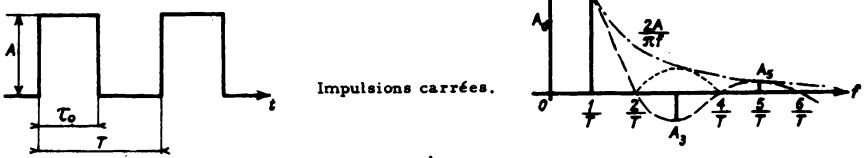
On peut donc exprimer A_o, A_n, et A_{eff} en fonction de A_s, les courbes universelles de la figure 1 représentent A_n/A en fonction de 2α, A étant supposé constant, alors que les courbes universelles de la figure 2 représentent A_n/A_s en fonction de 2α, A_s étant supposé constant.

Ces courbes sont d'un usage constant dans la détection, les amplificateurs de puissance classe C et les multiplicateurs de fréquence.

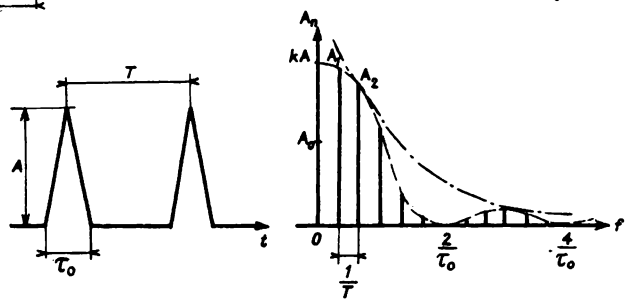
PLANCHE 1 : SPECTRE DES SIGNAUX PÉRIODIQUES ÉLÉMENTAIRES



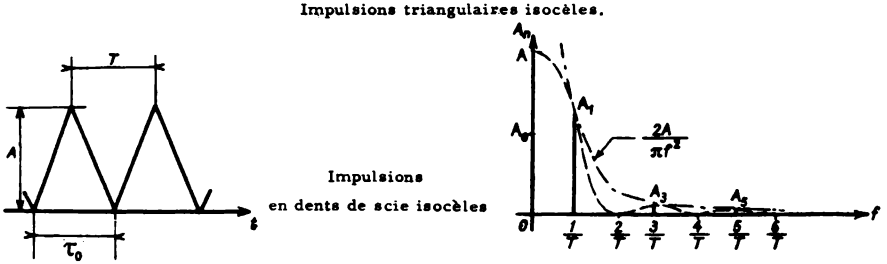
Impulsions rectangulaires.



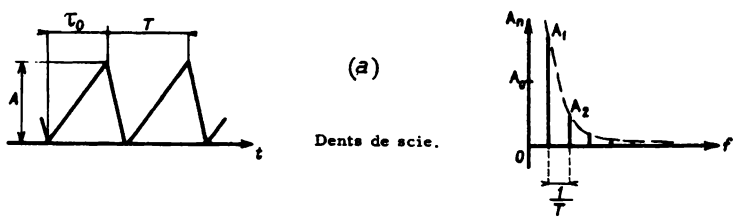
Impulsions carrées.



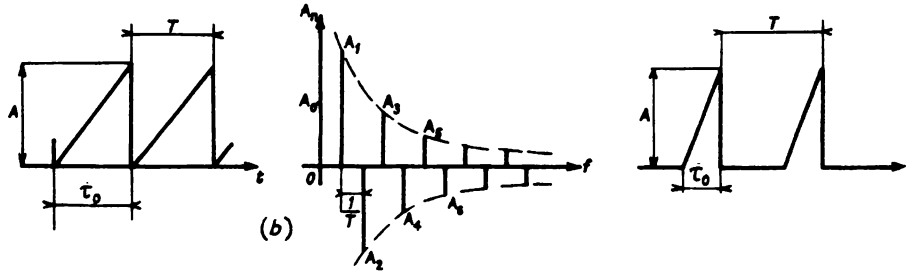
Impulsions triangulaires isocèles.



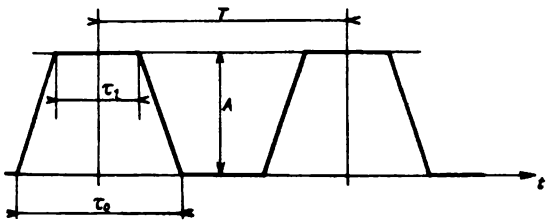
Impulsions
en dents de scie isocèles



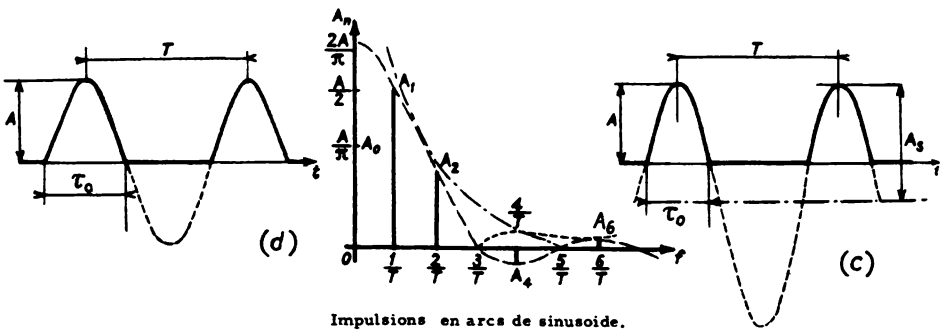
Dents de scie.



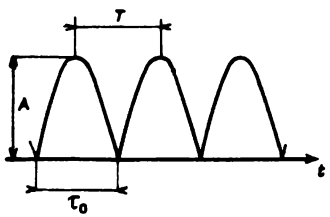
Impulsions en dents de scie.



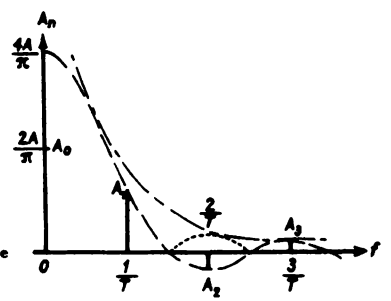
Impulsions trapézoidales



Impulsions en arcs de sinusoide.



Impulsions
en double demi sinusoide



Cas particulier important : (Pl. 1-d)

C'est le cas où l'on a $2\alpha = \pi$ correspondant à l'amplification en puissance classe B.

On a : $k=\frac{1}{2}$ $\alpha=\frac{\pi}{2}$

$$\varphi(t)=\frac{A}{\pi}\left[1+\frac{\pi}{2}\cos\omega_o t+\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n+1}\frac{2}{4n^2-1}\cos 2n\omega_o t\right]$$

$$A_o=\frac{A}{\pi} \qquad A_{eff}=\frac{A}{\sqrt{2}}$$

Le spectre ne comporte pas de termes impairs à l'exception, toutefois, du fondamental.

9. - Impulsions en double demi-sinusoïde. (Planche 1)

Ici $k = 1$; $\alpha=\pi$

$$\varphi(t)=\frac{2A}{\pi}\left[1+\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n+1}\frac{2}{4n^2-1}\cos n\omega_o t\right]$$

La fréquence propre de la sinusoïde $1/2T$ ne figure pas dans le spectre, le fondamental correspond à la fréquence de récurrence des arches, il y a doublage de la fréquence par rapport à la sinusoïde génératrice. Cette forme d'onde se rencontre dans certains problèmes de redressement.

Spectre d'un signal sinusoidal modulé en amplitude par un signal élémentaire

Le cas le plus simple, purement théorique, mais qui permet une généralisation immédiate des résultats obtenus aux signaux complexes est celui d'un signal harmonique $A \cos \Omega_o t$ modulé par un autre signal harmonique de pulsation ω

$$\psi(t)=A\left[1+m\cos\omega t\right]\cos\Omega_o t$$

m est le taux de modulation :

$$\psi(t)=A\left[\cos\Omega_o t+\frac{m}{2}\cos(\Omega_o-\omega)t+\frac{m}{2}\cos(\Omega_o+\omega)t\right]$$

Le spectre de $\psi(t)$ comprend ainsi 3 composantes : la fréquence porteuse Ω_o et deux raies latérales $\Omega_o-\omega$, $\Omega_o+\omega$ symétriques par rapport à la porteuse, chacune de ces raies ayant pour amplitude $mA/2$.

Si d'une façon générale, le signal de modulation a pour spectre :

$$\varphi(t)=\sum_{n=1}^{\infty}A_n\cos\left[n\omega_o t+\Phi_n\right]$$

chaque composante du spectre agissant comme si elle était seule modulera la porteuse et donnera naissance à deux raies latérales $\Omega_o - n\omega$ et $\Omega_o + n\omega$ et l'on aura :

$$\psi(t) = A\left[1 + m\,\varphi(t)\right]\cos\Omega_o t$$

$$= A\cos\Omega_o t + \frac{A}{2}\sum_{n=1}^{\infty} m_n \cos\left(\Omega_o + n\omega\right)t + \frac{A}{2}\sum_{n=1}^{\infty} m_n \cos\left(\Omega_o + n\omega\right)t$$

avec : $m_n = m\,A_n$.

Ainsi le spectre du signal modulé comprend la fréquence porteuse avec de part et d'autre le spectre du signal modulateur multiplié par m/2. La bande de fréquence occupée par le signal modulé est donc le double de celle du signal modulateur.

La modulation en amplitude constitue une véritable multiplication de l'onde porteuse qu'il ne faut pas confondre avec la superposition de deux signaux comme c'est le cas pour certains phénomènes de ronflement.

Tous les spectres A (f) donnés précédemment permettent d'obtenir facilement le spectre d'une onde H F modulée $\psi(t)$ par l'un d'eux, par simple décalage de A (f) le long des f et symétrie par rapport à $f_o = \frac{\Omega_o}{2\pi}$

L'emploi d'une onde porteuse Ω_o peut paraître une complication inutile dans un appareil de laboratoire et l'on peut se demander l'intérêt qu'il peut y avoir à passer par son intermédiaire pour amplifier par exemple le signal délivré par la cellule détectrice d'un spectrographe. C'est qu'en fait, un tel signal est à très basse fréquence et pratiquement continu; par suite il est difficile à transmettre et il y a plus d'intérêt dans un pareil cas, malgré la complication apparente, à utiliser, par exemple, l'artifice d'une porteuse.

Spectre des signaux isolées

Un signal $\varphi(t)$ isolé n'a plus de caractère périodique. Pour déterminer son spectre A(f), il faut faire appel à la transformée de Fourier

$$A(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t)\, e^{-j2\pi ft}\, dt$$

Inversement on a :

$$\varphi(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(f)\, e^{j2\pi ft}\, df \qquad (j^2 = -1)$$

Si dans ces deux relations on change t en - t, on voit que $\varphi(-t)$ et A (f) s'interchangent. Il en résulte que si A (f) est le spectre de $\varphi(t)$, $\varphi(-t)$ est le spectre de A (f).

Le spectre d'un signal isolé est un spectre continu; il n'y a plus de raies séparées comme dans le cas d'un signal périodique.

En fait, tout signal périodique dont la fréquence de répétition est grande devant la durée ($T \gg \tau_0$) constitue pratiquement un signal isolé. Pour un système transmetteur, un signal est isolé, lorsque le système n'a pas gardé la "mémoire" de celui qui l'a précédé dans le temps.

Le seul cas particulier intéressant parce que d'une grande importance pratique est l'impulsion unité. Un tel signal est en effet caractéristique des "bruits".

En reprenant le terme général A_n d'un signal du type impulsion rectangulaire, si l'on suppose $T \longrightarrow \infty$ ($\alpha \longrightarrow 0$, signal isolé) et $\tau_0 \longrightarrow 0$ avec $A \longrightarrow \infty$ mais $A\tau_c = Cte$, on voit que :

$$A_n = 2Ak \frac{\sin n\alpha}{n\alpha} = \frac{A\tau_0}{\pi} \frac{\sin n\alpha}{n\alpha} \omega_0$$

tend vers

$$A_n = \frac{A\tau_0}{\pi} \Delta\omega \quad \left(\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} = \omega_0, T \longrightarrow \infty\right)$$

Le spectre étant continu, on voit que quelle que soit la position dans l'échelle des fréquences de l'intervalle $\Delta\omega$ considéré, le signal y est également représenté (fig.3). Un tel spectre est dit "blanc"; il est caractéristique des parasites, quelle que soit leur origine, un bruit étant toujours un signal très bref ($\tau_0 \longrightarrow 0$) de grande amplitude ($A \longrightarrow \infty$) contenant une certaine énergie ($A\tau_0$, fini).

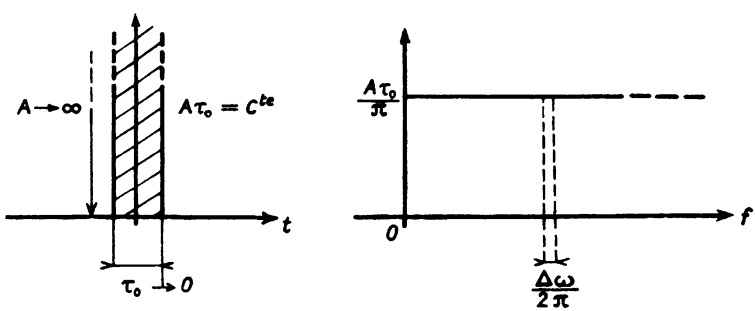


Fig. 3. - Spectre d'un signal parasite.

BANDES DE FRÉQUENCES A TRANSMETTRE

Théoriquement, un signal, quel qu'il soit (périodique ou non) occupe tout le domaine des fréquences positives. Si donc, on voulait le reproduire intégralement, les systèmes physiques chargés de la transmettre devraient passer sans distorsion toutes les fréquences.

Une solution pratique exige évidemment un compromis.

Ce compromis est essentiellement variable d'un cas à un autre et est fonction du but poursuivi. Il n'existe pas de critère général permettant d'apporter une solution rigoureuse. Les différents cas que l'on peut rencontrer peuvent toutefois se ramener

à deux types, suivant que l'on s'intéresse à des questions d'énergie ou de forme d'onde.

Pour fixer les idées, supposons avoir à transmettre des impulsions rectangulaires de durée τ_0 très espacée $T \gg \tau_0$. Admettons que le transmetteur ne permette de passer "correctement" que les fréquences comprises dans la bande B délimitée par $f = 0$ et $f = 2/\tau_0$. Si l'on a en vue des questions d'énergie, on sait que dans ce cas, on transmet 95% de l'énergie du signal. La bande transmise est donc de ce point de vue suffisante.

Supposons par contre que l'on veuille mesurer l'instant d'arrivée du front avant du signal, celui-ci qui est parfaitement défini dans le cas d'une transmission parfaite ne l'est plus ici, le signal ayant alors l'allure donnée par la courbe a de la fig. 4.

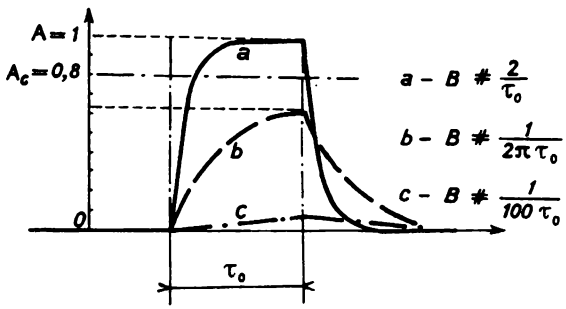


Fig. 4. - Influence de la bande passante.

Si l'on ne peut transmettre que la bande B comprise entre O et $f = 1/2\pi\tau_0$ l'énergie transmise n'est plus que 30% de celle du signal; ceci peut encore être acceptable si cette impulsion est simplement destinée par exemple à enclencher un dispositif auquel ces 30 % d'énergie suffisent. Par contre, la forme étant devenue celle de la courbe b de la fig. 4, si le but fixé est de compter les impulsions dont le niveau est supérieur à A_c, celle-ci ne sera pas comptée, alors qu'elle devrait l'être, son niveau étant à l'origine $A > A_c$.

Enfin, si l'on se propose d'intégrer le signal origine, ce n'est au contraire qu'une bande très faible que l'on devra transmettre, inférieure à $B = 1/100\,\tau_0$ par exemple (courbe C fig. 4), afin de parvenir au signal triangulaire cherché, l'amplitude du signal de sortie sera considérablement affaiblie par rapport à celle du signal à l'entrée du système, le but poursuivi étant par ailleurs atteint.

Il est donc non seulement souvent superflu, mais parfois nuisible de transmettre une large bande.

Enfin, si l'on songe aux difficultés que l'on rencontre dans la réalisation d'un amplificateur à large bande. Il semble bien inutile de se créer de telles difficultés pour l'avenir si ce n'est pas absolument nécessaire.

Le dernier point qu'il convient de ne pas perdre de vue, c'est que plus la bande du transmetteur sera grande, et plus les bruits de toute nature viendront surcharger le signal utile le grevant

d'autant plus qu'il sera faible à l'entrée, ceci résultant du spectre d'un parasite. Il peut être en conséquence dangereux de vouloir se donner une marge de sécurité en voulant transmettre une bande surabondante. Le signal à la sortie sera peut-être pratiquement parfait, mais si son amplitude est faible à l'entrée, on se trouvera peut-être après transmission, incapable de le sortir du bruit de fond propre au système, alors qu'en réduisant la bande transmise au minimum compatible avec le but poursuivi, le signal quoique faible et moins parfait, pourra être utilisé, le niveau de bruit étant moindre.

Il résulte de tout ceci que la détermination de la bande de fréquences nécessaire pour représenter correctement un signal ne saurait être à chaque fois qu'un cas particulier dans lequel peuvent intervenir des éléments très divers et parfois même contradictoires. C'est le cas lorsque l'on veut transmettre avec une grande fidélité le signal, ce qui exige une large bande, et éviter par ailleurs le plus possible l'influence des bruits, ce qui nécessite une réduction de la bande.

Le seul point qui soit général et qui apparaît à l'examen des signaux et de leur spectre, c'est que plus un signal est court, et plus la bande nécessaire à sa représentation est étendue, et inversement. On voit en effet que pour un signal de forme quelconque de durée $\Delta t = \tau_o$, son spectre occupe toujours un intervalle de fréquence Δf supérieur à $1/\tau_o$, l'intervalle $0, 1/\tau_o$ contenant la majeure partie de l'énergie contenue dans ce signal, mais non toute l'énergie. Ce que l'on peut exprimer sous la forme;

$$\Delta t, \Delta f > 1$$

Les deux cas limites étant d'une part le signal harmonique ($\Delta t, \infty$) occupant une bande de fréquence nulle ($\Delta f = 0$) puisqu'aussi bien son spectre se réduit à une raie à ω_o et d'autre part, la fonction top représentant le cas limite d'un bruit réel, pour lequel la durée est nulle ($\Delta t = 0$), mais qui occupe par contre tout le spectre ($\Delta f, \infty$).

L'inégalité ci-dessus peut d'ailleurs être établie d'une façon très générale en considérant un intervalle quelconque Δf de fréquence représentatif d'un signal dans l'échelle des fréquences et en déterminant l'intervalle correspondant à ce signal dans l'échelle des temps. Le calcul est purement analytique et indépendant de toute hypothèse physique.

Dans le cas d'une onde se propageant dans un milieu et ayant dans ce milieu un certain encombrement spatial Δx, une relation analogue existe dans laquelle intervient le facteur $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ au lieu de f.

Il n'est pas inutile de souligner au passage que ces deux relations très générales prennent la forme particulière des relations d'incertitude dans le cas de la mécanique quantique (1).

---

(1) On a en effet $E = h\nu$ ($\nu = f$, fréquence), $\Delta\nu = \Delta E/h$ et $\Delta f . \Delta t > 1$ devient $\Delta E . \Delta t > h$ tandis que $\lambda = h/p$ (p = quantité de mouvement) donne $\Delta k = 2\pi \Delta \frac{1}{\lambda} = 2\pi \frac{\Delta p}{h}$, $\Delta k \Delta x$ devient alors $\Delta p . \Delta x > \frac{h}{2\pi}$

Toutes les questions qui viennent d'être évoquées à propos des spectres de fréquence sont d'un intérêt et d'une portée générale en physique. Dans tout ce qui a été dit, rien n'est spécifiquement propre aux systèmes électroniques, la dernière remarque faite en est une preuve. Il se trouve, toutefois, que ces questions sont d'un usage permanent dès que l'on veut amplifier un signal ou le transformer à l'aide d'un tube et d'un circuit.

QUALITÉS REQUISES POUR UN TRANSMETTEUR

Jusqu'ici,ce sont essentiellement des considérations de nombre de composantes à transmettre qui ont été envisagées. Ce nombre étant déterminé, c'est-à-dire la bande à transmettre fixée, il s'agit de déterminer les caractéristiques essentielles du système qui devra les "passer". Ces qualités sont au nombre de deux, à savoir :

- une transmission uniforme en amplitude, dans toute la bande
- un délai de transmission constant, dans toute la bande.

Le premier point est évident et est, d'une façon générale plus facile à satisfaire que le second. A tel point que lorsqu'on parle de la bande passante d'un réseau, on n'envisage le plus souvent que sa réponse en amplitude, ignorant généralement sa réponse en phase. Cet oubli peut être grave. Considérons en effet un signal d'entrée

$$\varphi_e(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos\left[n\,\omega_o t + \Phi_n \right]$$

et supposons que dans la bande ω_m , ω_M du spectre des amplitudes du signal jugée suffisante à sa reproduction, chaque composante soit déphasée par le transmetteur d'une quantité :

$$\Phi = 2\pi f \Theta \quad \text{où } \Theta = \text{Cte}$$

le signal de sortie sera :

$$\varphi_s(t) \sum_{n=m}^{n=M} A_n \cos\left[n\,\omega_o (t - \Theta) + \Phi_n \right]$$

il ne sera pas déformé, étant en effet identique au signal d'entrée, à ceci près qu'il a subi dans le temps un retard Θ , Θ est le délai de transmission du système. Ce délai doit être constant dans toute la bande à transmettre, sinon le signal n'est plus seulement retardé, mais également déformé. Ainsi le déphasage apporté par le système peut ne pas être nul; l'essentiel est qu'il soit une fonction linéaire de la fréquence. C'est en fait bien souvent une question de phase plus qu'une question d'amplitude qui détermine la bande passante effective à donner au transmetteur. Il est en effet fréquent de voir dans un système la caractéristique de phase altérée avant celle des amplitudes vers les extrémités basses et hautes de la "bande" B.

RÉPONSE DES CIRCUITS
BANDE DE FRÉQUENCES TRANSMISE

Tous les circuits passifs plus ou moins complexes que l'on peut imaginer et réaliser ne comportent que trois éléments de nature différente, soit :

- des éléments résistants R essentiellement positifs (certains tubes à vide peuvent apporter des éléments "réels" négatifs - résistance négative - de même que certains ensembles RC)
- des éléments inductifs L correspondant dans le plan complexe à la partie positive de l'axe des j (les inductances mutuelles M étant de même nature)
- des éléments capacitifs C portés par la partie négative de l'axe des j.

Les ensembles les plus classiques sont examinés dans la suite du point de vue de leur réponse.

SÉLECTIVITÉ - DÉCIBELS - DÉFINITION CONVENTIONNELLE DE LA BANDE PASSANTE

Tout circuit présente entre ses bornes une impédance Z, fonction de la fréquence f. Si l'on suppose exciter un tel circuit par un courant $Ie^{j\omega t}$ d'amplitude I constante (excitation à courant constant) une tension $U = ZIe^{j\omega t}$ est développée à ses bornes celle-ci est maximum en même temps que Z soit pour $Z = Z_o$ où $U = U_o$. L'étude de la réponse d'un système a une excitation, en fonction de la fréquence de celle-ci, revient donc dans ces conditions à l'étude de l'impédance que présente ce système, entre ses bornes, à toute fréquence.

Afin d'obtenir des conclusions valables pour tous les circuits d'un même type, on considère généralement le rapport $\left|\frac{Z}{Z_o}\right| = s$ qui caractérise la variation relative de la tension développée aux bornes du circuit pour une excitation à I constant. $\left|\frac{Z}{Z_o}\right|$ est généralement maximum pour $Z = Z_o$ et de part et d'autre de Z_o, la courbe décroît plus ou moins rapidement. Cette décroissance caractérise la sélectivité du circuit. Plutôt que de caractériser cette sélectivité par le rapport $s = \left|\frac{Z}{Z_o}\right|$ on préfère utiliser la grandeur également sans dimension :

$$\sigma = 20 \log \left|\frac{Z}{Z_o}\right|$$

σ est la sélectivité du circuit et s'exprime en décibels (dbs). Lorsque par exemple U est tombé à $U_o/\sqrt{2}$ ($s = 1/\sqrt{2}$), c'est-à-dire d'environ 30% par rapport à son maximum, on a $\sigma = -3$ dbs. Les valeurs f_1 et f_2 de f qui donnent un affaiblissement de 3 dbs déterminent par convention la bande passante B du système : $B = f_2 - f_1$, f_1 et f_2 sont les fréquences quadrantales ou fréquences

critiques. Dire qu'un circuit passe la fréquence f c'est dire que f est à l'intérieur de f_1, f_2. On considère généralement comme infini un affaiblissement σ de 60 dbs qui correspond à un rapport $s = 10^{-3}$ entre U et U_o.

Suivant le type de circuit, on peut considérer, soit une excitation à courant constant, soit une excitation à tension constante; les mêmes notions, en ce qui concerne la réponse, s'introduisent.

CONSTANTE DE TEMPS θ D'UN CIRCUIT - TEMPS DE RÉPONSE τ

L'introduction de la notion de bande passante se fait à partir de l'analyse en fréquence point par point. Le fait que la bande soit limitée apporte une distorsion du signal appliqué. C'est ce que l'on constate fig.4 par application du signal carré. Il apparaît que le réseau est incapable d'effectuer le passage brusque de O à A; partant de O, il ne parvient à A qu'au bout d'un certain temps pratiquement fini (réponse transitoire). Ce passage de O à A est caractérisé par une loi de forme :

$$a(t) = A\left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}}\right)$$

alors que le passage inverse de A à O l'est par :

$$a(t) = A\, e^{-\frac{t}{\theta}}$$

θ est une constante caractéristique du système et plus précisément de son inertie et de son amortissement, c'est sa constante de temps. Il apparait ainsi que dire qu'un système possède une certaine constante de temps θ ou dire qu'il ne peut passer qu'une bande de fréquence limitée revient au même. Constante de temps et bande passante sont intimement liées et caractéristiques l'une comme l'autre du système. La constante de temps est définie d'une façon tout aussi arbitraire que la bande passante, puisque c'est conventionnellement le temps θ au bout duquel le système est encore écarté de la fraction I/e de la valeur correspondant à son équilibre final.

Il est inutile d'opposer θ et B. C'est sous deux formes différentes, exprimer la même chose.

En analysant un système par un signal à front raide - qui possède un spectre très riche - on ne fait somme toute qu'une analyse globale en fréquence au lieu de la faire point par point. θ et B sont d'ailleurs rigoureusement liés pour chaque circuit. D'une façon générale, plus B est petit et plus θ est grand.

Signalons l'utilisation par certains du temps de réponse défini comme le temps τ au bout duquel le système est parvenu dans un état correspondant aux 99% de son état d'équilibre. Il est facile de voir que l'on a $\tau = 4{,}6\,\theta$.

Cette notion est utilisée parfois dans les ensembles électromécaniques. Le temps de réponse correspond au "temps de montée" dans un signal carré.

RÉPONSE DES CIRCUITS RC SIMPLES - DÉRIVATION ET INTÉGRATION DES SIGNAUX

a. - Circuits CR. (Fig. 5 *a*1)

1 - Un circuit de ce type attaqué par une tension E sinusoïdale (excitation à E constant) délivre une tension de sortie U telle que (réponse en fréquence) :

$$U = E \cdot \frac{R}{R + \frac{1}{jC\omega}}$$

soit k = U/E le coefficient de transmission :

$$k = \frac{1}{1 - j\frac{f_o}{f}} \qquad \text{avec} \qquad f_o = \frac{1}{2\pi RC}$$

soit

$$k = |k| e^{j\Phi} \qquad |k| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_o}{f}\right)^2}} \qquad tg\,\Phi = \frac{f_o}{f}$$

en prenant f_o/f pour paramètre, on peut tracer des courbes universelles donnant $|k|$ et Φ (fig. 6a - b - c).

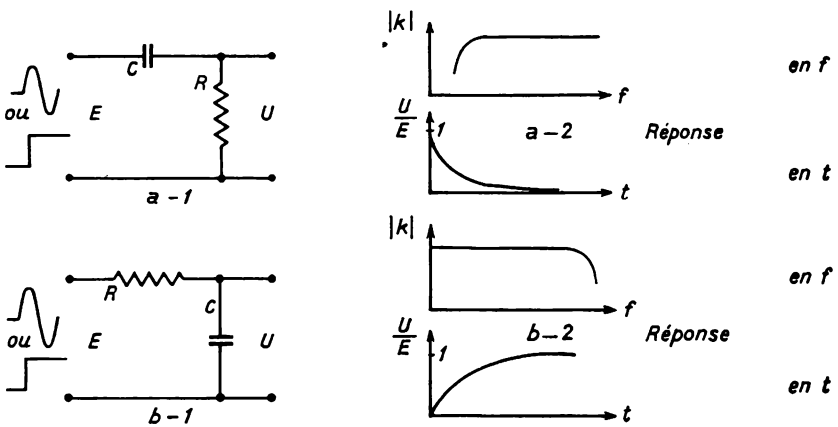


Fig. 5. - Réponse des circuits CR et RC.

Pour les fréquences basses, U est affaibli et déphasé en avant sur E.

Un tel circuit (qui théoriquement passe les fréquences élevées jusqu'à l'infini) n'a pas de réalité physique puisqu'en fait, il existe toujours en parallèle sur R une capacité parasite limitant la réponse aux H.F. Néammoins, il garde tout son intérêt pratique du point de vue réponse aux basses fréquences, et c'est uniquement de ce point de vue qu'il est envisagé ici. On retrouve en particulier ce type de circuit dans l'amplificateur RC.

La fréquence à 3 dbs est $f_o = \frac{1}{2\pi RC}$

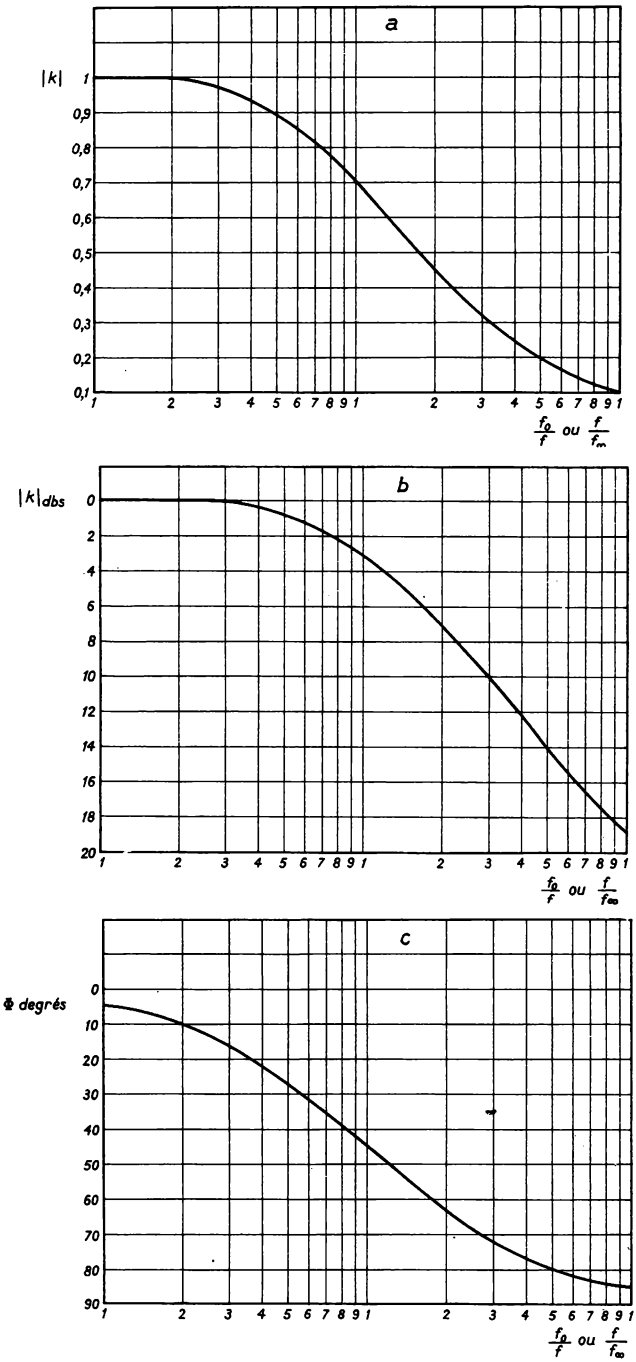


Fig. 6. - Réponse des circuits CR et RC en fréquence, courbes universelles.

2 - Si au même circuit est brusquement appliquée une tension continue E, on a pour U (réponse transitoire) l'expression classique telle que :

$$\frac{U}{E} = e^{-\frac{t}{\theta_o}} \qquad \text{où} \qquad \theta_o = RC$$

la courbe est donnée fig.7.

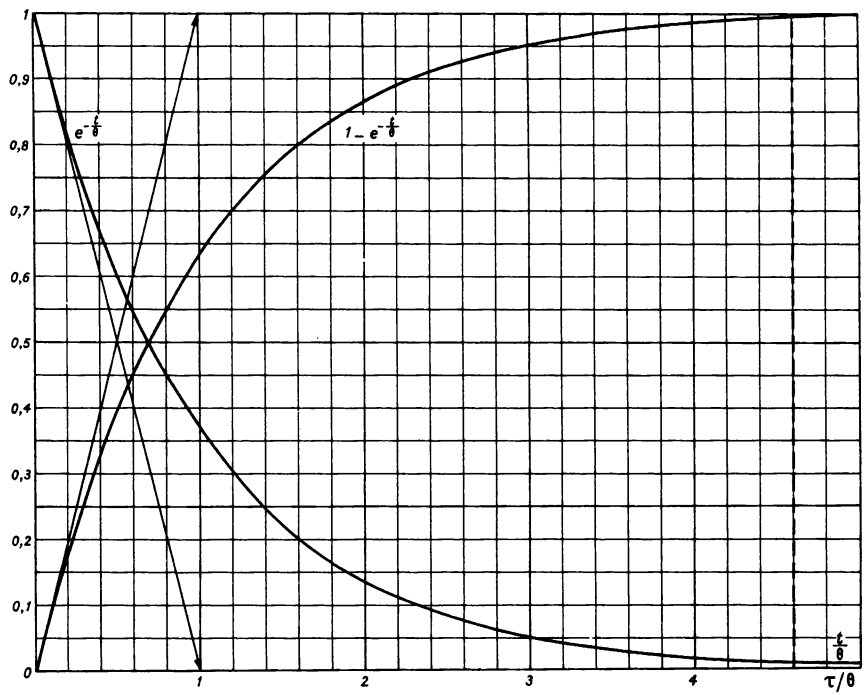


Fig. 7. - Réponse transitoire des circuits CR et RC.

Ces deux réponses - en fréquence et en temps - sont utiles pour l'élaboration d'un amplificateur à résistance - capacité et l'étude de sa réponse aux fréquences basses.

3 - Si E est un signal quelconque appliqué à l'entrée, comme

$$Ri + \frac{1}{C}\int_o^t i\,dt = E \qquad \text{si} \qquad Ri \ll \left|\frac{1}{C}\int_o^t i\,dt\right| \quad (1)$$

on a :

$$i \neq C\frac{dE}{dt} \qquad U = RC\frac{dE}{dt}$$

U est la tension dérivée de E par rapport au temps, si E est harmonique (1) se traduit par $RC\omega \ll 1$.

Si E a un spectre complexe (signal carré par exemple) la condition doit être également satisfaite pour les harmoniques. Pratiquement pour un carré de récurrence T, ($\omega = \frac{2\pi}{T}$) on prend

$RC\omega = 10^{-1}$ à 10^{-2} suivant la qualité cherchée pour le différenciation. Si l'on désire simplement obtenir des pointes de tension 10^{-1} peut suffire. Pour un signal que l'on désire dériver réellement (au sens mathématique), il faut prendre 10^{-2}. Si E est sinusoïdal, U l'est également, mais déphasé de $\pi/2$ en avant et affaibli dans le rapport de $RC\omega$ à 1. Dans le cas d'un signal à montée très raide, les pointes de tension obtenues peuvent être très importantes (fig.8).

Dans le cas par exemple d'un signal carré de 10 Volts, crête = E, de temps de montée $\tau = 10^{-6}$ S et de durée $\frac{T}{2} = 10^{-3}$ S en prenant $RC \frac{2\pi}{T} = 10^{-2}$ soit $RC \# 3.10^{-6}$ on a :

$$U = RC \frac{dE}{dt} = 4,6 \quad \frac{RC}{\tau} E \# 140 \text{ volts.}$$

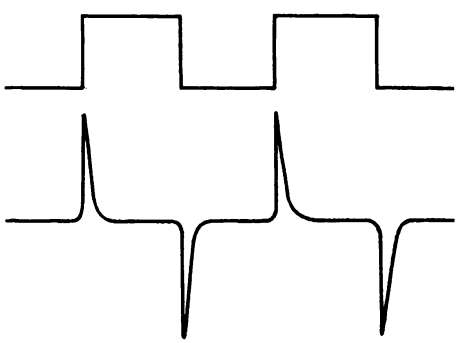


Fig. 8. - Dérivation.

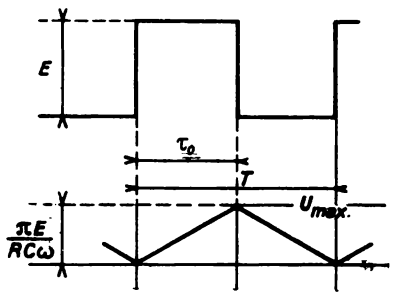


Fig. 9. - Intégration.

b. - Circuit RC. (Fig. 5 *b*1)

1 - Pour ce circuit le coefficient de transmission dans le cas d'une attaque sinusoïdale donne :

$$k = \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_\infty}} \qquad \text{avec } f_\infty = \frac{1}{2\pi RC} \qquad \text{soit}$$

$$k = |k| e^{j\Phi} \qquad k = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\infty}\right)^2}} \qquad tg\,\Phi = -\frac{f}{f_\infty}$$

Les fréquences hautes sont affaiblies, pour ces fréquences U est déphasé en arrière sur E. En prenant pour paramètre f/f_∞ - au lieu de f_0/f comme dans le cas précédent - on a les mêmes courbes pour $|k|$ et Φ (fig.6a - b - c).

Le circuit RC peut servir de filtre passe-bas grossier.

2 - La réponse transitoire du circuit est donnée par :

$$\frac{U}{E} = 1 - e^{-\frac{t}{\theta_\infty}} \qquad \text{où} \qquad \theta_\infty = RC$$

La courbe est donnée fig.7.

La fréquence $f_\infty = \frac{1}{2\pi RC}$ est la fréquence à 3 dbs et la bande passante est ici $B = f_\infty$ comme $\theta_\infty = RC$, on vérifie que B et θ sont liés. Ici $B = \frac{1}{2\pi\theta}$

La réponse d'un amplificateur RC aux fréquences élevées se ramène à ce cas.

3 - Si E est un signal quelconque et Ri tel que :

$$Ri \gg \left| \frac{1}{C} \int_o^t i\,dt \right| \qquad (2)$$

on a :

$$i \neq \frac{E}{R} \qquad \text{et} \qquad U = \frac{1}{RC} \int_o^t E dt$$

la tension de sortie correspond à l'intégration de E par rapport au temps. La condition (2) se traduit pour un signal harmonique par $RC\omega \gg 1$, dans le cas d'un signal ayant un spectre complexe si cette condition est satisfaite pour le fondamental, elle l'est a fortiori pour les harmoniques. Pour pouvoir intégrer un signal, il faut qu'il soit déjà d'une amplitude notable, sous peine d'obtenir un signal de sortie pratiquement inutilisable, parce que trop faible. Pour reprendre l'exemple du carré, si E est son amplitude, on aura (fig. 9).

$$U_{max} = \frac{1}{RC} \int_o^{\tau_o} E dt = \frac{E\tau_o}{RC} \qquad \text{soit comme}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{et} \quad \frac{\tau_o}{T} = \frac{1}{2} \qquad U_{max} = \frac{\pi E}{RC\omega}$$

Un signal carré de 50 volts donnera avec $RC\omega = 50$ un signal triangulaire ayant une tension crête de l'ordre de 3 volts.

Comme pour intégrer il faut un circuit à grande constante de temps la bande passante $B = \frac{1}{2\pi\theta}$ est faible. L'intégration d'un phénomène conduit toujours à une réduction de la bande passante.

- Conditions à remplir dans une réalisation

Il est courant qu'un système RC dérivateur ou intégrateur soit utilisé directement sur la charge plaque d'un tube T_1 et que sa sortie attaque la grille d'un tube T_2.

1 - Dans le cas de la différenciation (fig. 10-a) C peut servir de condensateur de liaison entre T_1 et T_2 et R de résistance de fuite de grille pour T_2, mais il faut veiller à ce que le module de l'impédance d'entrée du RC soit grand vis-à-vis de la charge de plaque R_p de T_1 pour ne pas affecter celle-ci. Il faut donc choisir le RC tel que $R^2C^2\omega^2 + 1 \gg R_p^2C^2\omega^2$ c'est-à-dire tel que $R_p C\omega \ll 1$ condition qui détermine C, d'où R puisque $RC\omega \ll 1$.

2 - Dans le cas de l'intégration (fig. 10-b) on devra avoir de même $|Z|_{RC} \gg R_p$ et de plus $R_g \gg \frac{1}{C\omega}$ soit $R > R_p$ et $R_gC\omega \gg 1$; enfin γ devra avoir une impédance faible vis-à-vis de $|Z|_{RC}$, c'est-à-dire $\frac{C}{\gamma} \ll RC\omega$.

On peut évidemment réaliser de diverses façons ces montages, mais dans chaque cas des conditions d'impédances de ce genre sont à satisfaire; elles se ramènent à ceci : ce qui joue le rôle de source pour le R.C. doit avoir une impédance faible vis-à-vis de $|Z|_{RC}$ vu côté entrée, et la charge du RC doit être grande par rapport à $|Z|_{RC}$ vu côté sortie.

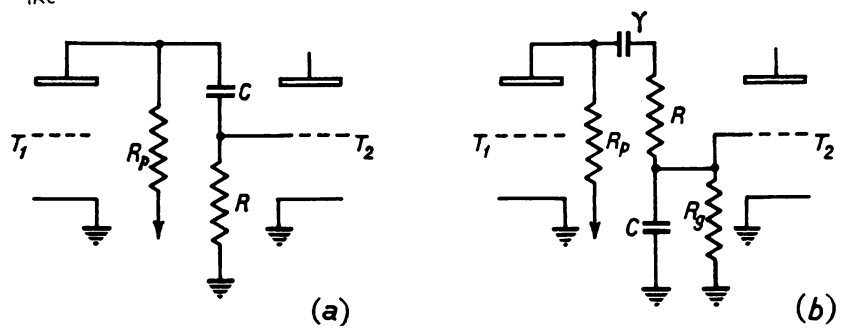


Fig. 10. - a) Dérivateur - b) Intégrateur.

Signalons enfin pour le cas de l'intégration, l'intégrateur de Miller d'un plus grand intérêt pratique.

CIRCUIT A BANDE PASSANTE ÉTROITE

a. - Circuit oscillant (CO) ou bouchon ou circuit antirésonant. (Fig. 11)

C'est le circuit type utilisé pour l'amplification sélective en moyenne et haute fréquence.

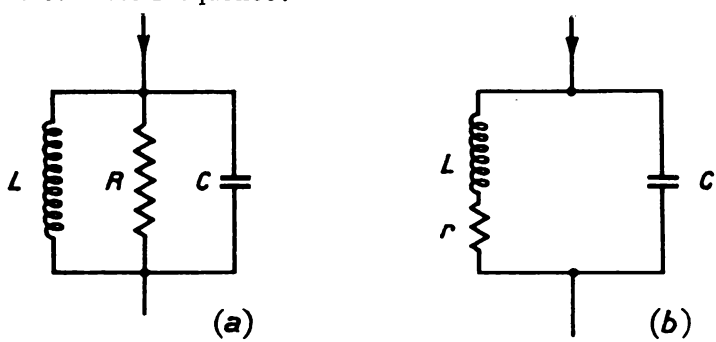


Fig. 11. - Circuit oscillant. Schémas équivalents.

On a : $\frac{1}{Z}=\frac{1}{R}+j\left(C\omega-\frac{1}{L\omega}\right)$

soit $Z=\frac{R}{1+jQ\left(\frac{\omega}{\omega_o}-\frac{\omega_o}{\omega}\right)}$ expression dans laquelle on a posé :

$\omega_o=\frac{1}{\sqrt{LC}}$ (pulsation propre) et $Q=\frac{R}{L\omega_o}=R\sqrt{\frac{C}{L}}$ (facteur de qualité ou coefficient de surtension).

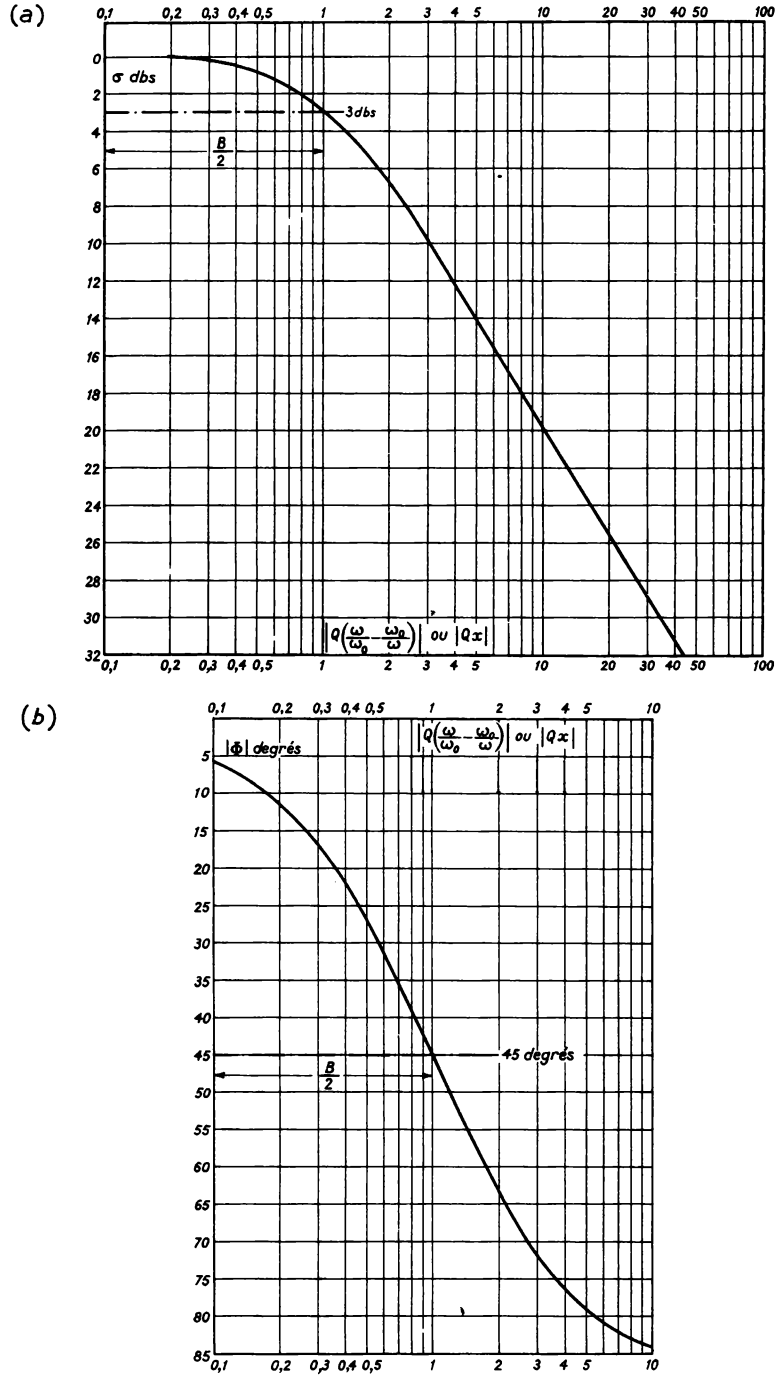


Fig. 12. - Circuit oscillant - Réponse en fréquence (Courbes universelles).

- Sélectivité :

La sélectivité du circuit est

$$S = \left[1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}}$$

puisque Z est maximum pour $\omega = \omega_o$ où $Z = Z_o = R$. Cette expression est rigoureuse, mais peu maniable pratiquement. Comme généralement on ne se préoccupe que de ce qui se passe au voisinage de l'accord, et que dans ce cas $\omega - \omega_o = \Delta\omega$ est faible, on peut poser :

$$\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} = \frac{\omega^2 - \omega_o^2}{\omega_o \omega} \# \frac{2\Delta\omega}{\omega_o} = 2x \quad (x>0 \text{ ou } <0)$$

x est la dissonance. Alors :

$$S = \left[1 + 4Q^2x^2\right]^{-\frac{1}{2}}$$

On voit que le facteur Q caractérise la qualité du système; plus Q sera élevé, plus la sélectivité du circuit sera grande et plus la bande passante étroite. Dans les circuits de la pratique, Q varie généralement entre 50 et 300, mais peut descendre beaucoup plus bas pour les fréquences élevées. L'introduction des paramètres sans dimension : Q facteur de qualité et $x = \frac{\Delta\omega}{\omega_o}$ désaccord relatif, groupés sous la forme d'un paramètre unique Qx sans dimension permet de tracer une courbe universelle (fig. 12a).

Les fréquences à 3 dbs f_1 et f_2 sont données par :

$$Q\left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right) = \pm 1 \quad \text{soit} \quad \begin{cases} f_2 = \frac{f_o}{2Q}\left(1 + \sqrt{1+4Q^2}\right) \# f_o\left(1 + \frac{1}{2Q}\right) \\ f_1 = \frac{f_o}{2Q}\left(-1 + \sqrt{1+4Q^2}\right) \# f_o\left(1 - \frac{1}{2Q}\right) \end{cases}$$

en supposant $1 \ll 4Q^2$.

et la bande passante est $B = f_2 - f_1 \# f_0/Q$, d'autant plus étroite que Q est élevé. Pour un circuit de fréquence propre $f_o = 100$ Kc/s avec un Q = 50, B = 2Kc/s. Il suffit de s'écarter de 1 Kc/s de part et d'autre de l'accord pour que la tension développée tombe d'environ 30%.

- Phase :

La phase de la tension U par rapport à l'excitation I est donnée par :

$$\text{tg } \Phi = -Q\left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right) \# -2Qx$$

pour : $\omega < \omega_o$ $x < 0$ $\Phi > 0$ U est en avance sur I (circuit selfique)

$\omega > \omega_o$ $x > 0$ $\Phi < 0$ U est en retard sur I (circuit capacitif)

La rotation de la phase est d'autant plus rapide au voisinage de la résonance que Q est élevé. On peut également tracer une courbe universelle de phase en fonction de Qx (fig. 12.b)

- Constante de temps :

L'étude de la réponse transitoire du circuit fait apparaître le facteur $e^{-\frac{t}{2RC}}$ c'est-à-dire que la constante du temps du système est : $\theta = 2RC$. On a donc: $\theta = 2RC = 2Q/\omega_o = 1/\pi B$

On vérifie ici que θ et B sont étroitement liés.

Supposons que l'on ait à véhiculer des informations sur porteuse à 100 Kc/s si l'on veut que l'ensemble ait un temps réponse de 10^{-3} s, le circuit utilisé devra avoir une constante de temps $\theta = \frac{\tau}{4,6} \# 2.10^{-4}$ soit une surtension de l'ordre de 60; tout circuit de meilleure qualité (du point de vue sélectivité) ne permettrait pas une réponse correcte.

La sélectivité peut s'écrire :

$$S = \left[1 + \theta^2 (\Delta\omega)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

- Délai de transmission

Il est défini par $\Theta = \frac{d\Phi}{d\omega} = -\frac{Q}{\omega} \frac{\frac{\omega}{\omega_o} + \frac{\omega_o}{\omega}}{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)^2}$

à la résonance

$$\Theta_{\omega_o} = -\frac{2Q}{\omega_o} = -\theta$$

au voisinage de la résonance Φ varie comme : $\Phi = -2Qx = -\theta \Delta\omega$

La courbe $\Phi(Qx)$ a pour pente -2 au voisinage de l'origine.

- Différents paramètres relatifs à un C.O.

Un C.O. peut être caractérisé par deux paramètres : sa fréquence propre et sa surtension (à la résonance), les seuls intéressants pratiquement, tous les autres y étant par ailleurs liés. Ces paramètres peuvent s'introduire sous diverses formes; quelques-unes ont été indiquées, d'autres sont utilisées surtout dans l'étude qui est faite de ce circuit dans les ouvrages classiques de physique. Ces différentes grandeurs sont résumées ci-dessous :

Pulsation propre ω_o, $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

Surtension propre Q, $Q = \frac{R}{L\omega_o} = R\sqrt{\frac{C}{L}}$

Fréquences quadrantales $\begin{cases} f_1, & f_1 \neq f_o \left(1 - \frac{1}{2Q}\right) \\ f_2, & f_2 \neq f_o \left(1 + \frac{1}{2Q}\right) \end{cases}$

Bande passante B, $B = f_2 - f_1 = \frac{f_o}{Q}$

Constante de temps θ, $\theta = 2RC = \frac{2Q}{\omega_o} = \frac{1}{\pi B}$

Délai de transmission Θ, $\Theta_{\omega_o} = -\theta$

Angle de perte β, $\operatorname{tg}\beta = \frac{1}{Q}$

Amortissement a, $a = \frac{1}{\theta}$

Décrément d, $d = \frac{1}{Q} = \operatorname{tg}\beta$

Décrément logarithmique (1) δ, $\delta = \frac{\pi}{Q} = \pi d$

- Signification de la surtension :

Dans la représentation figure 11a, R représente l'ensemble des pertes du circuit soit : résistance propre de la self, fuites du condensateur, pertes par rayonnement, amortissement créé par d'autres circuits lui étant plus ou moins liés, par les tubes auxquels le circuit est éventuellement associé... R caractérise ainsi toute l'énergie dissipée sous quelque forme que ce soit. La représentation figure 11a revient à attribuer d'une façon arbitraire l'ensemble des pertes à C; on peut utiliser une autre représentation figure 11b, où l'on attribue à L toutes les pertes. Dans ce cas, en écrivant que les deux schémas sont équivalents du point de vue impédance, quelle que soit la fréquence, on a :

$$Q = \frac{L\omega_o}{r} = \frac{R}{L\omega_o}$$

Comme en pratique il est plus aisé d'avoir des condensateurs de moindres pertes que des selfs de bonne qualité, la représentation b permet de se faire une idée a priori de la qualité du circuit que l'on peut réaliser avec une self donnée. On a en effet $r = r_c + r_f$, r_c étant la résistance propre de L en courant continu et r_f représentant les pertes supplémentaires dues à la fréquence. Ainsi la surtension du circuit sera finalement toujours :

$$Q < Q_c \quad \text{ou} \quad Q = \frac{L\omega_o}{r_c + r_f}, \quad Q_c = \frac{L\omega_o}{r_c}$$

La réprésentation 11a est toutefois d'un grand intérêt dans les amplificateurs, car, comme à l'accord, le circuit est équivalent à une résistance pure R, le gain de l'étage peut s'exprimer facilement.

On a dans le cas des pentodes, par exemple; $g = pR$ et $R = Q^2 r$ permet de se faire une idée a priori de la limite supérieure du gain que l'on pourra obtenir avec un tube de pente donnée p et une self donnée, on aura toujours $g < p\ Q^2 r_c$.

Le paramètre Q est une caractéristique essentielle du circuit RLC; il concrétise en effet l'amortissement (R) et l'inertie (L) du système excité sur sa fréquence propre $\left(\frac{1}{\sqrt{LC}}\right)$

(1) Le décrément logarithmique est défini à partir du rapport de 2 amplitudes maximum successives U_p et U_{p+1} de même sens, $\delta = \operatorname{Log} \frac{U_p}{U_{p+1}}$ lorsque le système après avoir été excité oscille librement.

En remarquant qu'à l'accord l'énergie moyenne emmagasinée dans le champ électrique ($\frac{1}{2} C U_o^2$) est égale à celle emmagasinée dans le champ magnétique, donc que l'énergie moyenne totale contenue dans les champs électriques et magnétiques est CU_o^2, on voit que $Q = RC\omega_0$ peut s'écrire :

$$Q = \pi \frac{CU_o^2}{\frac{1}{2}\frac{U_o^2}{R} T}$$

$\frac{1}{2}\frac{U_o^2}{R} T$ représentant l'énergie totale dissipée pendant une période du fait de l'ensemble des pertes ($T = \frac{2\pi}{\omega_o}$).

Cette relation permet entre autres de généraliser la notion de facteur de qualité à tout système ayant une fréquence propre (cavité électromagnétique, tuyau acoustique, etc...).

Enfin, il est essentiel de remarquer que Q n'a de sens qu'à la résonance ou en son voisinage immédiat.

- Mesure de Q :

La mesure de Q peut s'opérer très simplement, en excitant le circuit à l'aide d'une source à I = Cte, en réalisant l'accord par réglage de la fréquence à $f = f_o$ et en notant pour $f = f_o$ la valeur U_o de U, puis par variation de f, on cherche les 2 valeurs f_1 et f_2 pour lesquelles $U = U_o/\sqrt{2}$. On a alors $Q = \frac{f_o}{f_2 - f_1}$. Si on ne peut régler f on peut, en opérant de la même façon, procéder par variation de C, comme à l'accord $LC\omega_o^2 = 1$, on a $\frac{\Delta f}{f_o} = -\frac{\Delta C}{2C_o}$, soit à la fréquence fixe f_o, $Q = \frac{2C_o}{C_1 - C_2}$, C_o correspondant à l'accord sur f_o et C_1 et C_2 aux deux fréquences quadrantales f_1 et f_2.

- Remarque : dans le cas ou L et C possèdent des pertes respectives r et R, on a : $\frac{1}{Q} = \frac{r}{L\omega_o} + \frac{1}{RC\omega_o}$

- Circuits oscillants en cascade non couplés, calés sur la même fréquence.

C'est le cas des amplificateurs à circuits accordés à plusieurs étages. La sélectivité d'un ensemble de n circuits ainsi séparés et n'ayant aucune réaction l'un sur l'autre (circuits non couplés ou à couplage très lâche) est :

$$S_t = \prod_1^n S_n$$

ou

$$\sigma_t = \sum_1^n \sigma_n$$

La sélectivité de l'ensemble s'obtient donc par addition des sélectivités relatives à chaque circuit exprimées en dbs. Elle se déduit donc de la courbe de la fig. 12-a. Le cas des circuits couplés est différent. Dans le cas fréquent où les n circuits sont identiques et de constante de temps θ, on a pratiquement

$$S_t \neq \sqrt{1 + (\theta\sqrt{n})^2 (\Delta\omega)^2}$$

Ainsi à l'accord ou en son voisinage immédiat (mais seulement dans ces conditions), on peut considérer que l'ensemble des n circuits se comporte comme un circuit unique de constante de temps $\theta_t = \theta \sqrt{n}$

Affaiblissement des harmoniques par un CO.

Dans le cas ou le courant d'excitation I du circuit n'est pas sinusoïdal, mais possède un spectre comportant une valeur moyenne I_o, un fondamental I_ω et des harmoniques $I_{2\omega}$, $I_{3\omega}$ ..., si le C.O. est accordé sur 2ω, celui-ci se comporte comme une résistance faible r pour I_o une inductance pour I_ω une résistance de valeur élevée R pour $I_{2\omega}$, une capacitance pour $I_{3\omega}$ et les harmoniques d'ordre supérieur.

Si comme c'est le cas couramment (amplificateurs de puissance) le circuit est accordé sur le fondamental ω_o pour un harmonique de rang n, la self a pour impédance :

$$Z_L = jLn\omega_o = jn\frac{R}{Q}$$

tandis que la capacité a pour impédance :

$$Z_c = -\frac{j}{Cn\omega_o} = -j\frac{R}{nQ}$$

c'est-à-dire que le circuit se comporte comme une impédance (capacitive).

$$Z = -j\frac{n}{n^2-1}\frac{R}{Q} \quad (n>1)$$

Du point de vue amplitudes des tensions V développées aux bornes du circuit par les différentes composantes de I, le coefficient d'affaiblissement K_n d'une harmonique (V_n) de rang n par rapport au fondamental (V_1) est :

$$K_n = \frac{n}{Q(n^2-1)}\frac{I_n}{I_1} = k_n\frac{I_n}{I_1}$$

Ainsi dans un amplificateur classe B ($2\alpha = \pi$) d'après les figures 1 et 2, le rapport entre I_2 et I_1 sera pour le courant plaque :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{0,2125}{0,5} = 0,425$$

Le rapport entre les tensions plaques correspondantes développées sera $\left(k_2 = \frac{2}{3Q}\right)$, $K_2 = k_2\frac{I_2}{I_1} \neq 0,3\,Q$.

soit pour un circuit de surtension Q = 100 un rapport entre V_2 et V_1 de 0,3%.

b. - Réseau RC double T (filtre double T). (Fig. 13)

Ce type de quadripole est utilisé pratiquement chaque fois que l'on a à effectuer une amplification sélective à basse fréquence Aux fréquences très basses (de quelques périodes à 500 c/s), il devient en effet impossible ou tout au moins difficile de réaliser des C.O. de bonne qualité, l'amplification à contre-réaction sélective utilisant le double T apporte une solution au problème. Ce réseau peut également être utilisé pour éliminer dans

une bande une fréquence fixe indésirable. L'intérêt d'un tel circuit est qu'il possède "une fréquence propre", tout en ne faisant intervenir que des éléments R, C à l'exclusion de tout élément inductif.

Si l'on suppose exciter le circuit entre ses bornes d'entrée (1 et 2 par exemple) à l'aide d'une tension V_e délivrée par une source d'impédance interne "faible" r, la tension à la sortie (entre 1 et 3) - l'appareil de mesure ou d'utilisation étant supposé d'impédance "grande" ρ sera V_s telle que $V_s = kV_e$ avec pour expression du coefficient de transmission k

$$k = \frac{(2RR'C^2\omega^2 - 1) + j\,(RR'^2C^2C'\omega^3 - 2RC\omega)}{(20R^2C^2\omega - 1) + j\,[2RC\omega(4R^2C^2\omega^2 - 5)]}$$

k peut être nul si les éléments sont tels que : $R'C' = 4RC$

et si la fréquence d'excitation est telle que :

$$\omega_o = \frac{1}{C\sqrt{2RR'}} = \frac{1}{R'\sqrt{\frac{CC'}{2}}}$$

Dans la pratique, on fait en sorte que :

$$\frac{R'}{R} = \frac{C'}{C} = n$$

l'expression de ω_o montre qu'il faut alors $n = 2$, moyennant quoi

$$\omega_o = \frac{1}{2RC}$$

expression simple et facile à manier pratiquement.

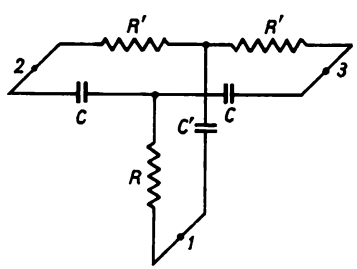


Fig. 13. - Réseau RC double T.

Il est important - sous peine de voir perdre au double T ses propriétés sélectives - de satisfaire aux conditions imposées à r et ρ. L'idéal serait que r soit nul et ρ infini. Dans la pratique, il n'en est jamais ainsi. On choisit donc les éléments constituant le filtre de façon que r soit faible devant le module de l'impédance d'entrée Z_e (impédance vue entre 1 et 2), à la fréquence ω_o et que ρ soit grand vis-à-vis du module de l'impédance de sortie Z_s (impédance vue entre 1 et 3) pour ω_o. Etant donnée la symétrie, ces impédances sont égales et telles que $Z_{e\omega_o} = Z_{s\omega_o} = R\,(1 - j)$, c'est-à-dire : $\left|Z_e\right|_{\omega_o} = \left|Z_s\right|_{\omega_o} = R\sqrt{2}$

On pose alors $(p \gg 1)$

$$r = \frac{R\sqrt{2}}{p} \ll R\sqrt{2} \quad \text{et} \quad \rho = pR\sqrt{2} \gg R\sqrt{2}$$

c'est-à-dire que R est déterminé par $R^2 = \frac{r\rho}{2}$, r et ρ étant connus.

Soit par exemple à réaliser un filtre sur f = 10 c/s et devant assurer une liaison entre une sortie cathodique de 200 Ω = r et une entrée grille classique, on prendra pour résistance de fuite de

grille 500 KΩ = ρ d'où R $\approx$ 7 KΩ , C sera donné par $C = \frac{1}{4\pi R f_o}$ soit C = 1,14 μF. Le filtre est ainsi complètement déterminé. Cet exemple est le cas qui se présente dans l'amplification sélective T B F. Il est prudent, dans la réalisation du réseau, de mesurer soigneusement les valeurs de R et C des éléments que l'on utilise, sinon la fréquence f_o est décalée et le résultat obtenu en ce qui concerne la sélectivité peut être en outre très différent de celui souhaité.

- Sélectivité des filtres double T à résistances - capacités,

En introduisant le paramètre sans dimension $y = \frac{\omega}{\omega_o}$

k s'écrit : $$k = \frac{1}{1 + j\frac{4y}{1-y^2}}$$

soit $k = |k| e^{j\Phi}$ avec $$|k| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{16\,y^2}{(1-y^2)^2}}}$$

et $$\text{tg}\ \Phi = -\frac{4y}{1-y^2}$$

expressions qui donnent lieu aux courbes universelles de la fig. 14.

Au voisinage de ω_o on peut mettre k sous la forme :

$$k \approx j\,\frac{\Delta y}{2}$$

expression utile pour le calcul de la sélectivité dans un amplificateur T B F.

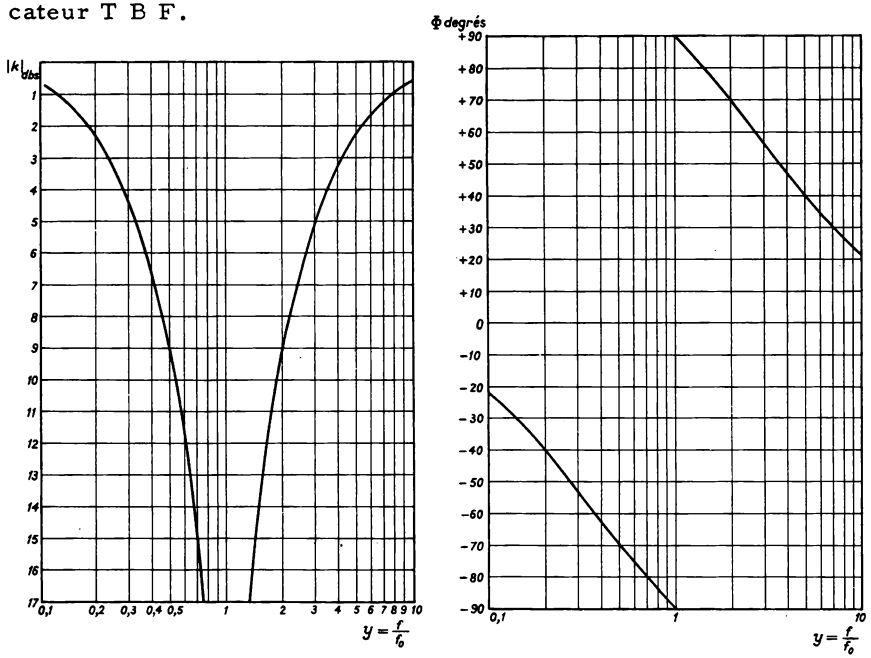


Fig. 14. - Double T - Réponse en fréquence (Courbes universelles).

CIRCUITS A LARGE BANDE

a. - Réseau complexe RC. (Fig. 15)

Ce réseau se rencontre dans l'amplification en tension, c'est dire son importance puisqu'en fait tout appareil de mesure comporte au moins un, sinon plusieurs étages amplificateurs de ce type.

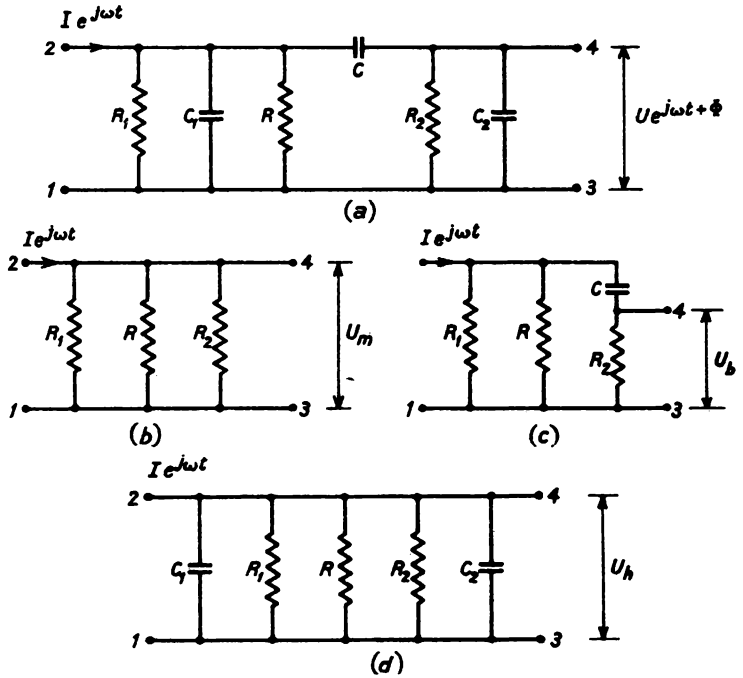


Fig. 15. - Réseau RC.

Dans la pratique, le problème se présente de la façon suivante : le réseau est parcouru par un courant constant $\bar{I}\, e^{j\omega t}$ (courant délivré par le premier tube) T_1 et la tension de sortie $U\, e^{j\omega t+\Phi}$ du réseau (entre 3 et 4) est la grandeur intéressante (tension d'attaque du deuxième tube T_2). Les tubes utilisés sont, en outre, du genre pentode; dans ces conditions les différents paramètres représentent respectivement :

R_1 la résistance interne de T_1 (de 500 KΩ à 1 MΩ)

C_1 la capacité de sortie de T_1 (environ 10 p f)

R la résistance de plaque de T_1 (de 10 K à 100 KΩ)

C la capacité de liaison T_1 , T_2 (de 5000 à 10.000 p f)

R_2 la résistance de fuite de grille de T_2 (de 100 KΩ à 1 MΩ)

C_2 la capacité d'entrée de T_2 (environ 10 pf)

Les ordres de grandeur indiqués ne le sont qu'à titre purement indicatif, étant susceptibles de grandes variations d'un cas à un autre.

Ce sont précisément ces éléments qu'il faudra déterminer dans chaque cas particulier, en fonction de la bande de fréquence à transmettre.

Pour l'étude de la réponse d'un tel circuit, il est commode de commencer par les fréquences centrales de la bande, puis d'examiner comment se comporte le système pour les fréquences basses et hautes correspondant aux extrémités de la bande.

- Réponse aux fréquences moyennes.

Les éléments C_1 et C_2 étant faibles, leur impédance est grande et n'affecte pas les valeurs des éléments parallèles R_1, R et R_2. De même C est grand, donc, a pratiquement une impédance négligeable et, étant série, n'intervient pas; le circuit se réduit alors à la fig. 15-b.

En posant : $\frac{1}{\rho}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R}+\frac{1}{R_2}$

La tension de sortie U est : $U_m=\rho I$

elle est en phase avec I.

- Réponse aux basses fréquences.

C_1 et C_2 ont a fortiori un effet négligeable. Il n'en est plus de même par contre pour C, de sorte que le réseau est équivalent à celui de la fig. 15-c. U est alors :

$$U_b=\frac{R_b R_2}{R_b+Z_b}$$

en posant $\frac{1}{R_b}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R}$ et $Z_b=R_2-\frac{j}{C\omega}$

en rapportant U_b à U_m, on a :

$$k_b=\frac{U_b}{U_m}=\frac{1}{1-\frac{j}{R_o C\omega}} \quad \text{où} \quad R_o=\frac{R_1 R}{R_1+R}+R_2$$

soit en posant :

$$f_o=\frac{1}{2\pi R_o C}=\frac{1}{2\pi\theta_o}\ ,\ \theta_o\ RC\ ,\ k_b=\frac{1}{1-j\frac{f_o}{f}}=\left|k\right|_b e^{j\Phi_b}$$

$$|k|_b=\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{f_o}{f}\right)^2}} \qquad \operatorname{tg}\Phi_b=\frac{f_o}{f}$$

Lorsque f diminue, $|k|_b$ décroît et il y a un affaiblissement de U qui s'accompagne d'une rotation de phase correspondant à une avance de U par rapport à I, la fréquence f_o est la fréquence critique basse. Pour $f = f_o$, la transmission a subi une chute de 3 dbs et la phase à tourné de $\pi/4$ (1).

(1) f_o fréquence critique est également appelée fréquence de demi-puissance ou quadrantale.

Les expressions de $|k|_b$ et Φ_b sont les mêmes que pour le C R élémentaire et donnent lieu aux mêmes courbes (fig. 6 - a - b - c)

Réponse aux fréquences élevées.

L'impédance de C n'affecte plus la transmission, mais les impédances de C_1 et C_2 deviennent de plus en plus faibles et ne peuvent plus être négligées devant R_1 R et R_2. Le schéma équivalent devient celui de la fig. 15-d.

En posant $\gamma = C_1 + C_2$ on a $\frac{1}{Z_h} = \frac{1}{\rho} + j\gamma\omega$

U devient U_h, tel que $U_h = Z_h I$

En rapportant U_h à U_m, on a :

$$k_h = \frac{U_h}{U_m} = \frac{1}{1 + j\rho\gamma\omega}$$

soit en posant :

$$f_\infty = \frac{1}{2\pi\rho\gamma} = \frac{1}{2\pi\theta_\infty}, \quad \theta_\infty = \rho\gamma, \quad k_h = \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_\infty}} = |k|_h e^{j\Phi_h}$$

$$|k|_h = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\infty}\right)^2}} \qquad \operatorname{tg}\Phi_h = -\frac{f}{f_\infty}$$

$|k|_h$ et Φ_h donnent lieu aux mêmes courbes que $|k|_b$ et Φ_b en prenant pour paramètre f/f_∞ au lieu de f_o/f la réponse est la même que celle du R C élémentaire. La fréquence f_∞ est la fréquence critique haute. L'affaiblissement y est de 3 dbs comme pour f_o, mais ici la rotation de phase correspond à un retard de U sur I.

Les fréquences f_o et f_∞ déterminent la bande passante B du circuit : $B = f_\infty - f_o$.

Ces résultats comparés aux réponses des circuits R C élémentaires amènent les reparques suivantes :

- la réponse du réseau RC aux basses fréquences étant la même que celle du circuit C R, à condition de remplacer E par ρI, R par R_o et C par C; il s'ensuit que la réponse transitoire du réseau est aux basses fréquences :

$$U_b = \rho I e^{-\frac{t}{R_o C}}$$

La transmission des basses fréquences correspond à la transmission du palier d'un carré.

- la réponse du réseau R C aux hautes fréquences étant la même que celle du circuit R C, à condition de remplacer E par ρI, R par ρ et C par γ; la réponse transitoire du réseau aux fréquences élevées est donc :

$$U_h = \rho I \left[1 - e^{-\frac{t}{\rho\gamma}}\right]$$

La réponse aux hautes fréquences correspond à la transmission du front raide d'un carré.

Ces deux remarques sont particulièrement utiles lorsque le signal à transmettre possède un spectre complexe. Dans le cas où les fréquences à transmettre sont bien définies, les courbes des figures 6-a, b, c permettent immédiatement de déterminer les fréquences f_o et f_∞ et par suite les caractéristiques du réseau.

Inversement, la connaissance de f_o et f_∞ pour un réseau permettra de connaître sa réponse transitoire.

Le lien étroit entre réponse en fréquence et réponse transitoire, se retrouve.

L'exemple suivant montre comment peut se poser le problème dans la pratique :

Supposons que l'on ait à transmettre des signaux carrés de durée $\tau_o = T/2 = 100\,\mu s$ avec les conditions suivantes :

- temps montée : 1 μs
- palier constant à 1%

D'après la deuxième remarque, le temps de montée τ caractérise la réponse aux fréquences élevées, et d'après la courbe de la fig. 7, on a $\tau = 4{,}6\,\theta$ soit 10^{-6} s, où $\theta = \theta_\infty = \rho\gamma$ c'est-à-dire $\rho\gamma = 2.10^{-7}$ s.

Supposons que $\gamma = C_1 + C_2 = 20$ p f, il faut alors $\rho = 10^4\ \Omega = 10\ K\Omega$.

En supposant une pentode de résistance interne $R_1 = 500\ K\Omega$ et une résistance de fuite de grille $R_2 = 150\ K\Omega$ l'expression de ρ donne alors $R = 11\ K\Omega$. Il s'ensuit $R_o = \frac{R_1 R}{R_1 + R} \neq 161\ K\Omega$

Par ailleurs, le palier devant être constant à 1% près, on doit avoir $e^{-\frac{t}{\theta}} = 0{,}99$ pour $t = \tau_o = T/2 = 100\,\mu s = 10^{-4}$ s, comme il caractérise la réponse B.F., on a $\theta = \theta_o = R_o C$, $e^{-\frac{\tau_o}{\theta_o}} = 0{,}99$ donne $\tau_o/\theta_o \neq 10^{-2}$ soit $\theta_o = 10^{-2}$ s, d'où $C = 6{,}26.10^{-8} \neq 63.000$ pf.

Les fréquences critiques sont $f_\infty = 800$ Kc/s et $f_o = 15$ c/s.

Cet exemple montre la bande considérable de fréquence qu'il faut transmettre. En particulier, il faut pouvoir transmettre les fréquences basses à partir de 15 c/s alors que la fréquence de récurrence du signal est $f_1 = 1/T = 5$ Kc/s. C'est donc bien en dessous de cette fréquence qu'il faut pouvoir transmettre correctement. On voit en effet que pour cette fréquence, $f_o/f_1 = 3.10^{-3}$ c'est dire qu'elle est pratiquement transmise sans aucune distorsion ni d'amplitude, ni de phase (la phase pour f_1 est $\Phi \neq 10$ minutes). Enfin, comme $f_\infty/f_1 = 160$, c'est seulement le 160ème harmonique de f_1 qui est affaibli à 3 dbs.

D'après les courbes, on voit que l'affaiblissement vers les fréquences hautes commence à apparaître pour $f/f_\infty \neq 0{,}25$ soit

ici pour f = 200 Kc/s, ce qui correspond à l'harmonique 40 de f_1. Pour cette fréquence, la phase a déjà tourné d'environ 14° (par rapport aux fréquences centrales de la bande).

b. - Circuits antirésonants à accords décalés.

Il peut arriver que l'on ait à transmettre une bande de fréquence bien délimitée avec dans cette bande une réponse extrêmement plate (en amplitude) et qu'en outre on désire voir en dehors des limites de la bande la transmission tomber très rapidement.

Imposer une telle condition à la réponse en amplitude entraîne évidemment pour la caractéristique de phase certaines distorsions. Le délai de transmission n'aura pas le caractère linéaire que l'on exige parfois.

Dans certains cas, cela pourra importer assez peu. Par exemple, si l'on a à transmettre un signal pratiquement harmonique dont la fréquence d'un cas à un autre peut varier dans de grandes limites, la phase n'interviendra pas puisqu'à chaque fois, c'est pratiquement un signal sinusoïdal pur que l'on aura à transmettre.

Si f_1 et f_2 sont les fréquences limites de la bande ($B = f_2 - f_1$) et f_o la fréquence centrale définie par $f_o^2 = f_1 f_2$, cela revient à désirer une réponse en amplitude caractérisée par :

$$S(y) = \left\{ K^2 \left[1 + \left(\frac{y}{y_\ell} \right)^{2n} \right] \right\}^{-\frac{1}{2}} \qquad (1)$$

où $y = \frac{f}{f_o} - \frac{f_o}{f}$ et $y_\ell = y$ pour f_1 et f_2, $y_\ell = B/f_o$ (K et n = Ctes)

Supposons alors grouper n circuits bouchons chacun étant accordé sur une fréquence f_{ok} propre à chacun, et supposé avoir une surtension propre Q_k, si ces circuits sont mis en cascade et n'ont aucune réaction l'un sur l'autre (c'est-à-dire que deux circuits consécutifs seront séparés par un tube, et ne feront l'objet d'aucun couplage entre eux), la réponse de l'ensemble sera de la forme

$$\prod_{k=1}^{n} \left\{ 1 + Q_k^2 y_k^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \qquad (2)$$

où $y_k = \frac{f}{f_{ok}} - \frac{f_{ok}}{f}$

Si en outre, on fait en sorte que les n circuits soient groupés par paires telles que deux circuits p et q d'une même paire aient des fréquences propres, f_{op} et f_{oq} telles que $f_{op} \cdot f_{oq} = f_o^2$, et qu'en outre, ces deux circuits aient même surtension, alors (2) ne dépend plus que de $y = \frac{f}{f_o} - \frac{f_o}{f}$. Dès lors (1) et (2) sont de même degré en y, et la réponse en amplitude cherchée peut être obtenue en identifiant (2) à (1).

On détermine ainsi les fréquences propres de chacun des circuits et la surtension propre à chaque paire, on a :

$$\left(\frac{f_{ok}}{f_o}+\frac{f_o}{f_{ok}}\right)\frac{1}{2Q_k}=\frac{B}{f_o}\ \sin\,(2k-1)\frac{\pi}{2n}$$

$$\left|\frac{f_{ok}}{f_o}-\frac{f_o}{f_{ok}}\right|\sqrt{1-\left(\frac{1}{2Q_k}\right)^2}=\frac{B}{f_o}\cos(2k-1)\frac{\pi}{2n}$$

ces relations sont rigoureuses.

Pratiquement si $B/f_o < 0,4$ on a :

$$\frac{1}{Q_k}\neq\frac{B}{f_o}\ \sin\,(2k-1)\frac{\pi}{2n}$$

$$\left|f_{ok}-f_o\right|\neq\frac{B}{2}\ \cos\,(2k-1)\frac{\pi}{2n}$$

ces dernières relations suffisent généralement et permettent en tout cas un dégrossissage du problème, puis, si besoin est, les relations exactes donneront la correction à apporter. Le nombre de circuits à utiliser sera déterminé, ou bien par un affaiblissement fixé à l'avance en dehors de B, ou bien par des considérations de gain à obtenir dans le cas d'un amplificateur.

On peut remarquer que si le nombre de circuits est impair, il en existe un de calé sur f_0, sa surtension étant alors $Q = f_o/B$.

PRINCIPE DE DUALITÉ

Les quelques circuits qui se rencontrent le plus souvent ont été rapidement passés en revue. On peut en rencontrer et en imaginer bien d'autres. Afin de ne pas être amené dans chaque cas à des calculs d'impédances et de réponse parfois longs, on pourra utiliser le principe suivant connu sous le nom de principe de dualité (ou de correspondance):

La réponse d'un circuit série, excité par une source de tension constante (c'est-à-dire d'amplitude constante) et de résistance interne nulle est la même que celle d'un circuit parallèle excité par une source à intensité constante et de résistance interne infinie, à condition de faire correspondre aux admittances $\mathcal{A}$ du circuit parallèle (conductances G et susceptances Y), les impédances Z (résistances r et réactances x) du circuit série, et au courant dans le circuit série (réponse), la tension aux bornes du circuit parallèle (réponse). De même la tension aux bornes d'une des impédances du circuit série sera la même que le courant dans l'admittance correspondante du circuit parallèle. C'est-à-dire que, d'une façon générale, les équations et résultats relatifs à un circuit parallèle sont les mêmes que ceux du circuit série obtenu en remplaçant tous les éléments parallèles du premier par des éléments série tels que :

G = 1/R soit remplacé par r

C " L

L " C

I (d'excitation) par U (d'excitation)

u (réponse) " i (réponse)

Aisni à l'admittance : $\mathcal{A} = G - jY$
correspond l'impédance : $Z = r + j\,x$
avec les relations suivantes entre les différents éléments :

$$G = \frac{r}{r^2 + x^2} \qquad Y = \frac{x}{r^2 + x^2}$$

$$r = \frac{G}{G^2 + Y^2} \qquad x = \frac{Y}{G^2 + Y^2}$$

En particulier les différents circuits de la fig.16 se correspondent, et la réponse de l'un d'eux peut être déduite de celle supposée connue de son correspondant, ceci est vrai entre autres, pour les constantes de temps de chacun.

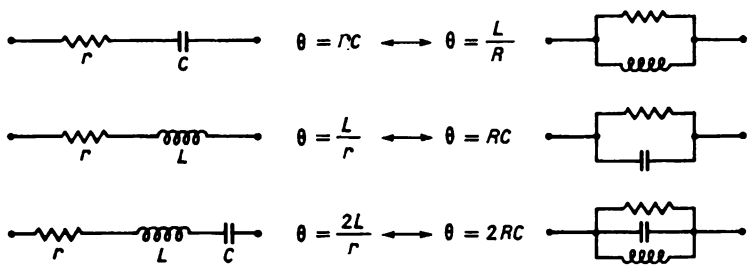


Fig. 16. - Dualité des circuits.

LES TUBES A VIDE

Un tube à vide est essentiellement un générateur de courant. C'est là un point important qu'il ne faut jamais perdre de vue. L'obtention d'une tension à partir d'un tube nécessitera en conséquence toujours l'introduction d'une impédance - d'une façon générale d'un réseau - dans le circuit du tube.

Les tubes à vide apportent de nouvelles possibilités, mais il ne faut cependant pas croire que l'on peut tout leur demander. Un tube quelconque n'amplifiera pas n'importe quel signal dans des conditions de fonctionnement arbitraires. Trois points sont particulièrement importants :

1 - Un tube quel qu'il soit possède toujours une ou plusieurs courbes caractéristiques desquelles découlent un certain nombre de paramètres : résistance interne, pente, coefficient d'amplification. Ce sont les paramètres fondamentaux du tube.

2 - Il possède également un certain nombre de caractères secondaires - mais d'une grande importance dans l'utilisation pratique - tels que capacités interélectrodes, résistance de bruit, etc...

3 - Enfin, il comporte ses propres limites au-delà desquelles il ne faut plus attendre de lui une réponse correcte. En outre,

tout dépassement de ces limites est préjudiciable à la vie du tube. Ce sont entre autres, la dissipation maximum admissible sur la plaque, le courant maximum que l'on peut tirer de sa cathode, etc...

Un tube dont on ne possède ni les réseaux caractéristiques, ni les paramètres secondaires, ni les limites, est rigoureusement inutilisable.

Il est regrettable de constater que les constructeurs se soucient assez peu de donner ces différentes caractéristiques. Pour certains tubes, la dissipation plaque maximum admissible n'est même pas indiquée, la résistance de bruit n'est pas donnée pour un tube sur cent, etc... Il est fréquent d'être obligé de tracer les réseaux soi-même, ceux donnés dans les catalogues étant très insuffisants. Par contre, des conditions dites "conditions normales d'utilisation" sont indiquées; il convient de se méfier de ces données superflues des catalogues; elles ne sont peut-être pas les plus appropriées au cas à résoudre, parfois, elles sont radicalement contraires au but poursuivi.

LES DIODES

Caractéristiques d'une diode

Le tube est prévu pour fonctionner avec une certaine tension de chauffage V_f pour laquelle il consomme un certain courant f . Il est dangereux de chauffer un tube sous une tension différente de celle indiquée par le constructeur (1).

Chauffé dans les conditions prévues, le tube possède une caractéristique I_p (V_p), (courant plaque en fonction de la tension plaque par rapport à la cathode), bien déterminée dont l'allure est donnée fig. 17, V_p étant la tension supposée positive de la plaque par rapport à la cathode, le courant dans le tube suit une loi en $V_p^{3/4}$. La courbe présente une région pratiquement rectiligne . Sur cette caractéristique, on peut définir la résistance interne du tube en un point : $1/R_i = dI_p/dV_p$. La résistance interne est une notion dynamique (définition différentielle) qu'il ne faut pas confondre avec la résistance équivalente $R_{équ.} = V_p / I_p$ (ou résistance apparente). Toutefois, pratiquement, dans le cas des diodes, on peut dans un grand intervalle, confondre à quelques pour cent près R_i et $R_{équ.}$.

Pour les tubes modernes à cathode à oxydes, le courant de saturation théorique ne peut être atteint (le tube est tué avant) et

---

(1) Signalons, toutefois, que pour les tubes chauffés sous 6,3 volts, il est parfois indiqué de se mettre aux environs de 6,2 volts; on obtient ainsi une réduction du souffle propre aux tubes et dans le cas des triodes et pentodes une meilleure stabilité des gains, la pente des tubes étant moins sensible aux variations de chauffage aux alentours de 6,2 volts.

En règle générale, il ne faut jamais descendre V_f au-dessous de 6 volts ni monter au-dessus de 6,5 volts pour les tubes à 6,3 volts.

la limitation introduite par la cathode est le courant maximum I_{max} qu'elle peut débiter instantanément sans risque d'arrachement. Cette limitation est très importante dans le cas d'une excitation par tension impulsive . Il faut vérifier qu'au moment de la crête de tension appliquée, le courant instantané reste inférieur à I_{max} .

Par ailleurs, on ne peut dissiper sur la plaque une puissance P_p supérieure en valeur moyenne à une certaine limite $P_{p\,max}$ (dissipation maximum) sous peine de l'échauffer exagérément et de produire une déformation de celle-ci, entraînant une modification de la géométrie du tube (donc de ses caractéristiques) et pouvant même produire à la limite un court-circuit interne.

Sous peine de claquages internes, il ne faut pas appliquer entre les différents éléments des tensions supérieures à certaines limites : tension maximum entre filament et cathode, d'une part, tension maximum entre cathode et anode d'autre part; précisons que dans ce dernier cas, cette tension correspond à une plaque négative par rapport à la cathode (tension inverse).

Dans le cas des diodes, les constructeurs indiquent les valeurs maxima possibles du courant redressé et de la tension redressée. Enfin, pour la diode, les seules capacités intervenant sont celles existant entre filament et cathode (C_{fc}) et cathode plaque (C_{pc}). Cette dernière apporte une limitation dans l'utilisation des diodes en H.F. Pour les fréquences élevées, C_{pc} conduit en effet à un court-circuit de l'espace interélectrodes. L'ordre de grandeur de C_{pc} est de quelques pf. Le schéma équivalent d'une diode est indiqué fig. 17.

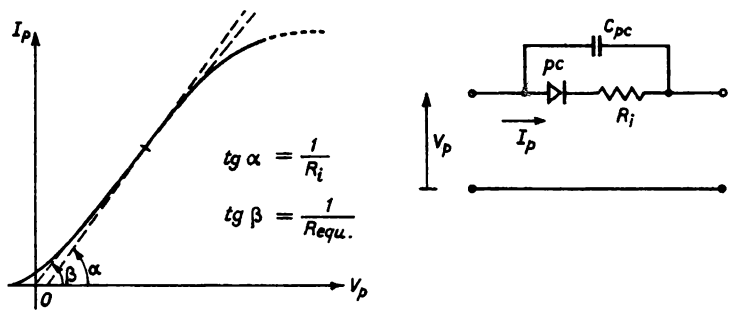


Fig. 17. - Diode.

Indiquons également que la résistance équivalente de bruit d'une diode est toujours supérieure à sa résistance interne.

Les caractéristiques fondamentales indiquées ici pour des diodes se retrouvent pour les tubes à plusieurs électrodes.

D'une façon générale, l'utilisation des tubes à vide classiques - seuls envisagés ici - est limitée du côté des fréquences élevées d'une part, par la présence des capacités interélectrodes, et d'autre part, par un temps de transit devenant non négligeable, en H.F. du fait que les électrons, quoique animés d'une grande

vitesse, mettent un temps non nul pour parvenir de la cathode à la plaque (temps de transit).

Dans certains cas, la résistance de bruit équivalente au tube peut constituer également une limitation.

Utilisation des diodes a vide pour le redressement et la détection

Que le problème soit un problème de redressement ou de détection, il se présente toujours pratiquement de la façon suivante : partant d'une tension alternative sinusoïdale, obtenir une tension continue qui lui soit proportionnelle. La seule différence entre les deux points de vue étant que dans le cas du redressement, on veut obtenir une tension continue fixée et déterminer la tension alternative nécessaire, alors que dans le cas de la détection, la tension alternative est donnée et que l'on cherche à obtenir une tension continue égale généralement à la valeur crête de la sinusoïde. Les relations liant les différents paramètres sont les mêmes dans les deux cas, la façon de les utiliser seule diffère.

Le problème se présente donc sous la forme indiquée fig. 18. La source S (de résistance interne r faible, mais non nulle) est un transformateur dans le cas du redressement, un C.O. dans le cas de la détection. Dans une alimentation, R est fictif, c'est la charge que constitue l'appareil alimenté $R = U/\bar{i}$, $\bar{i}$ est la composante continue du courant redressé, c'est $\bar{i}$ qui est soutiré par l'appareil d'utilisation. Alors que dans la détection, R est effectivement inséré dans le circuit.

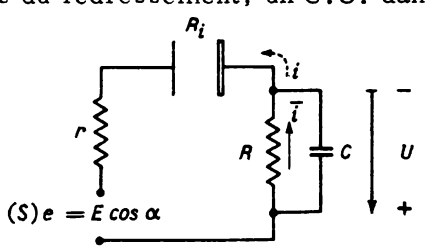


Fig. 18. - Détection et redressement.

Le condensateur réservoir C étant tel qu'à la fréquence de travail on ait $1/C\omega \ll R$ (condition correspondant à une condition d'intégration) si la tension alternative $e = E \cos \omega t$ d'amplitude E est suffisamment grande, de façon à pouvoir assimiler la caractéristique de la diode à une droite, le courant dans la diode est :

$$i = \frac{1}{R_i + r} (E \cos \alpha - U)$$

r = résistance interne de la source (compte tenu dans le cas du redressement du primaire (1), Ri = résistance interne du tube, $\alpha = \omega t$

pour $\alpha = \alpha_o$ (α_o = demi angle d'ouverture) i = O, donc $U = E \cos \alpha_o$

et $$i = \frac{E}{R_i + r} (\cos \alpha - \cos \alpha_o)$$

(1) Si E_o est la tension primaire, $n = E / E_o$ le rapport de transformation, r_p et r_s les résistances primaire et secondaire, $r = r_s + n^2 r_p$

Le calcul de la valeur moyenne de i sur une période donne :

$$\bar{i} = \frac{E}{\pi (R_i + r)} \left(\sin \alpha_o - \alpha_o \cos \alpha_o \right)$$

où α_o est en radian. Comme $U = R\bar{i} = E \cos \alpha_o$ on a :

$$\frac{\pi (R_i + r)}{R} = \operatorname{tg} \alpha_o - \alpha_o$$

Ainsi, sous réserve que les hypothèses faites sur C et E soient remplies, l'angle d'ouverture $2\alpha_o$ est déterminé uniquement par les paramètres $r + R_i$ et R ($R = U/\bar{i}$). Une fois α_o (ou $\cos \alpha_o$) déterminé, E est connu si U et i sont fixés (cas de redressement), ou bien R est déterminé si E est donné et α_o fixé (cas qui se présente dans la détection crête par exemple).

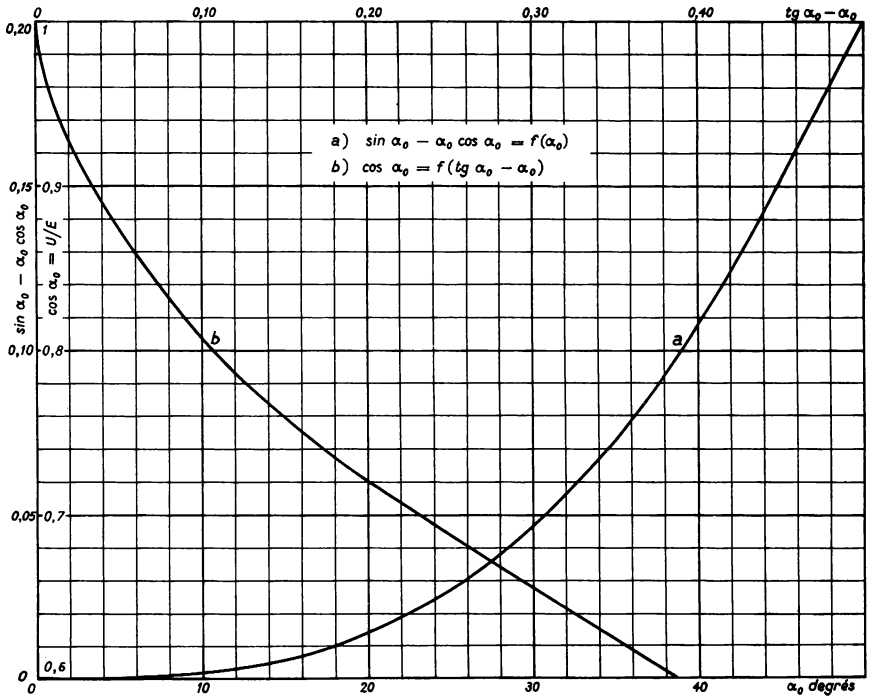


Fig. 19. - Détection et redressement - Courbes universelles.

On peut donc traçer les courbes universelles a et b de la fig. 19 qui sont d'un usage courant en pratique.

La puissance fournie par la source est : $\left(t_0 = \frac{\alpha_0}{\omega} \right)$

$$P_s = \frac{1}{T} \int_{-t_o}^{+t_o} ei \, dt = \frac{E^2}{4\pi (R_i + r)} \left[2\alpha_o - \sin 2\alpha_o \right]$$

la puissance utile, c'est-à-dire fournie effectivement à l'utilisation (dissipée dans R) est :

$$P_u = U\bar{i} = \frac{E^2}{\pi (R_i + r)} \cos \alpha_o \left[\sin \alpha_o - \alpha_o \cos \alpha_o \right]$$

la puissance totale perdue est donc :

$$P_t = P_s - P_u = \frac{E^2}{2\pi(R_i+r)}\left[\alpha_o + 2\alpha_o\cos^2\alpha_o - 3\sin\alpha_o\cos\alpha_o\right]$$

cette puissance est dissipée partie dans r (source), partie dans Ri (tube), c'est-à-dire sur la plaque. La puissance dissipée sur la plaque P_p doit être telle que

$$P_p = P_t\,\frac{R_i}{R_i+r} < P_{p\,max}$$

tandis que les pertes Joule dans les enroulements sont :

$$P_{tr} = P_t\,\frac{r}{R_i+r}$$

Du point de vue de la source, la charge ρ équivalente à la puissance fournie, est telle que :

$$P_s = \frac{E^2_{eff}}{\rho} = \left(\frac{E}{\sqrt{2}}\right)^2\frac{1}{\rho} \quad \text{soit} \quad \rho = \frac{R\,(\sin\alpha_o - \alpha_o\cos\alpha_o)}{\cos\alpha_o(\alpha_o - \sin\alpha_o\cos\alpha_o)}$$

dans le cas de la détection où bien souvent on fonctionne en détection crête (α_o très petit, $U \neq E$), on a pratiquement :

$$\left(\frac{E}{\sqrt{2}}\right)^2\frac{1}{\rho} = \frac{U^2}{R} \quad \text{soit} \quad \rho = \frac{R}{2}$$

Ainsi dans ce cas, le CO subit un amortissement supplémentaire correspondant à une résistance parallèle = R/2 et non à R. Ce dernier point est important puisqu'il affecte d'une façon parfois non négligeable la sélectivité du circuit.

Filtrage avec condensateur en tête. (Fig. 20 a)

La tension U obtenue est en fait une tension pseudo-continue, puisqu'en dehors de $-t_o$, $+t_o$ C se décharge partiellement dans R (fig.20). Il existe donc aux bornes de R une ondulation de tension dont l'amplitude crête à crête 2. Δ U est telle que

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\pi}{RC\omega} = \delta \qquad \text{(ondulation relative)}$$

A cette ondulation correspond une ondulation fondamentale U_1 , c'est-à-dire qu'aux bornes du RC, on a :

$$U + U_1\cos(\omega t + \Phi_1) + U_2\cos(2\omega t + \Phi_2) + \ldots$$

Il est donc nécessaire d'introduire un filtre généralement du type indiqué fig.20-a (filtrage par capacité en tête).

En supposant que U_1 reste le même après introduction du filtre, et en lui attribuant la valeur maximum possible, soit : $U_1 = \Delta U$, après filtrage, U_1 donne lieu à la sortie à une tension V_1 telle que : (en supposant $L\omega >> 1/\Gamma\omega$ et $1/\Gamma\omega << R$)

$$\frac{V_1}{U_1} = \frac{1}{L\Gamma\omega^2} = k_1 \qquad (k_1 \text{ coefficient de filtrage})$$

c'est-à-dire que : $\dfrac{V_1}{U} = \dfrac{\delta}{L\Gamma\omega^2} = \sigma_1$

σ_1 est le facteur d'ondulation.

V_1 est l'ondulation résiduelle après filtrage.

Les résiduelles V_2 V_3 .., qui correspondraient à U_2 U_3 ... sont pratiquement négligeables devant V_1 qui reste ainsi seul à envisager.

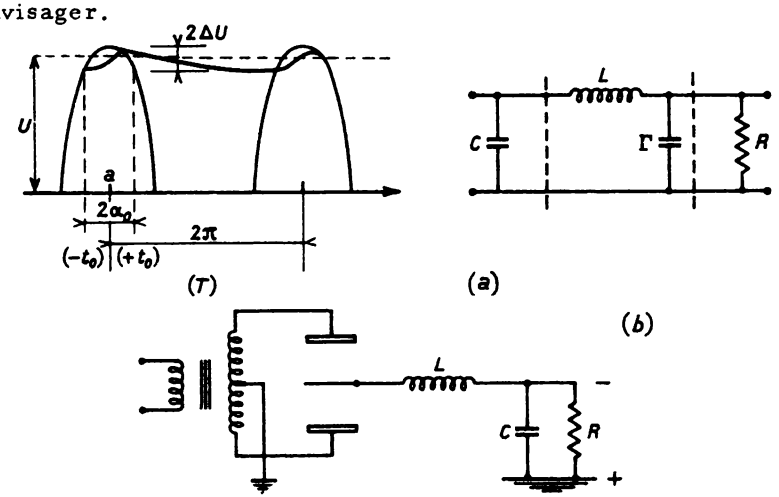


Fig. 20. - Filtrage.

Redressement des deux alternances avec condensateur en tête.

C'est là le cas le plus employé, on a alors :

$$\bar{i} = \frac{2E}{\pi(R_i + r)} (\sin \alpha_o - \alpha_o \cos \alpha_o)$$

où r est la résistance d'un demi-enroulement et R_i la résistance de chaque élément diode, le courant dans chaque valve - au moment où elle débite - gardant par ailleurs la même expression que précédemment, on a $U = E \cos \alpha_o$ et par suite :

$$\operatorname{tg} \alpha_o - \alpha_o = \frac{\pi(R_i + r)}{2R}$$

ici $P_s = \frac{E^2}{2\pi(R_i+r)} \left[2\alpha_o - \sin 2\alpha_o\right]$,

$$P_u = \frac{2E^2}{\pi(R_i+r)} \cos \alpha_o \left[\sin \alpha_o - \alpha_o \cos \alpha_o\right]$$

$P_t = P_s - P_u$, pour chaque plaque, on a : $P_p = P_t \frac{R_i}{2(R_i+r)}$

Les pertes Joule dans le transformateur sont $P_{tr} = P_t \frac{r}{R_i + r}$

ici $\delta = \Delta U / U = \frac{\pi}{2RC\omega}$ $(\omega = 2\pi/T)$

Le fondamental de ΔU est dans ce cas de pulsation 2ω et a pour amplitude maximum possible $U_2 = \Delta U$, à U_2 correspond sur le RC, V_2 tel que :

$$\frac{V_2}{U_2} = \frac{1}{4LC\omega^2} = k_2$$

en supposant

$$2L\omega \gg \frac{1}{2\Gamma\omega} \quad \text{et} \quad \frac{1}{2\Gamma\omega} \ll R$$

c'est-à-dire que :

$$\frac{V_2}{U} = \frac{\delta}{4L\Gamma\omega^2} = \sigma_2$$

Filtrage avec self en tête - Cas du redressement des deux alternances (Fig. 20 *b*)

Le mécanisme du redressement est ici différent. En l'absence du filtre, le potentiel sur la cathode est représenté par des impulsions en double demi sinusoïdes (Pl. 1).

A cette tension correspond une valeur moyenne U_{moy} et un fondamental U_2 tels que :

$$U_{moy} = \frac{2E}{\pi} \quad \text{et} \quad U_2 = \frac{4E}{3\pi}$$

Supposant $L\omega \gg \frac{1}{C\omega}$ et $R \gg \frac{1}{C\omega}$ ($\omega = 2\pi/T$), désignant par r' la résistance de L (r et R_i gardant la même signification que plus haut) et posant $r + R + r' = r_1$, on a sur C une tension U telle que :

$$U = \frac{2E}{\pi} - r_1 \bar{i} = R\bar{i} \quad \text{soit} \quad U = \frac{2E}{\pi} \frac{R}{R + r_1}$$

avec les hypothèses faites, à U_2 correspond sur C une tension V_2 (fréquence 2ω), telle que :

$$\frac{V_2}{U_2} = \frac{1}{4LC\omega^2} = k_2$$

d'où un facteur d'ondulation :

$$\sigma_2 = \frac{V_2}{U} = \frac{R + r_1}{6RLC\omega^2}$$

La comparaison entre les deux modes de filtrage indiqués conduit aux remarques suivantes :

1) - pour U déterminé avec C en tête, E est plus faible qu'avec L en tête.

2) - Par contre, avec L en tête, si le courant $\bar{i}$ soutiré par l'utilisation varie, U varie moins que dans le cas de C en tête.

On utilisera donc le filtre avec self en tête dans le cas d'un appareil de consommation variable.

Données pratiques.

Cas de redressement : le problème consiste à déterminer les caractéristiques d'un transformateur (E), alors que celui-ci intervient déjà dans le calcul (r). De telle sorte que la question

peut paraître insoluble. On peut se faire une idée a priori, de la valeur approximative de r à l'aide de l'abaque de la fig. 21 donnant l'ordre de grandeur de r pour les transformateurs rencontrés dans la pratique en fonction de la puissance utile redressée ($P_u = U \bar{i}$).

Notons au passage que r, caractéristique pourtant essentielle - sous peine d'être conduit à de très vagues approximations - n'est jamais donné par les constructeurs de transformateurs. En ce qui concerne R_i la détermination est aisée à partir de la caractéristique du tube. Un ordre de grandeur courant pour Ri est quelques centaines d'ohms (400 à 500 Ω).

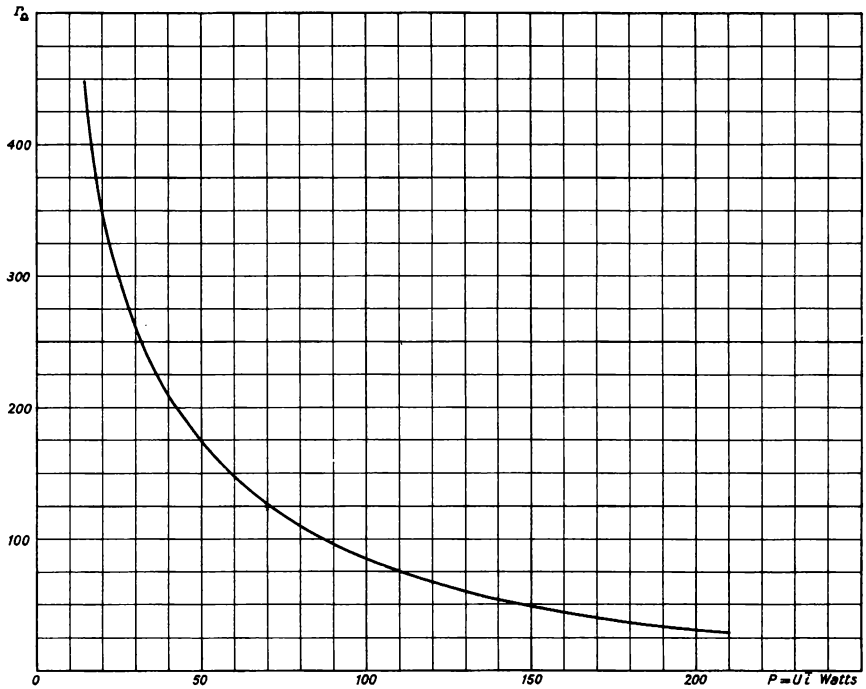


Fig. 21. - Résistance apparente d'un 1/2 enroulement secondaire pour les transformateurs usuels.

Dans le calcul de U, il faut tenir compte (quel que soit le type de filtre utilisé) de la chute $r'\bar{i}$ produite dans la self de filtrage, de sorte que c'est en fait $U' = U + r'\bar{i}$ qu'il faut produire et introduire dans les calculs. Là encore, la connaissance de r' suppose le problème résolu. Dans un cas concret, on pourra se faire une idée de r' pour les selfs rencontrées dans la pratique à l'aide du tableau I.

On procédera par approximations successives en se fixant a priori une valeur de L, $\bar{i}$ étant connu, on a r' que l'on peut introduire dans les calculs. Si le calcul du filtre donne par la suite une valeur trop élevée de Γ, on reprendra le calcul avec une autre valeur de L. Cette seconde approximation est généralement très suffisante. Il convient de ne pas perdre de vue que les valeurs

TABLEAU I

$\bar{i}_{mA}$ =	100	120	120	150	250	55	130
L_{henry} =	6	6	17,5	18	6	30	30
r'_{Ω} =	200	200	320	220	85	545	230
$\bar{i}_{mA}$ =	40	280	200	500	60	100	100
L_{henry} =	40	10	20	10	8	4	5
r'_{Ω} =	357	90	150	56	400	100	200

de L données par les constructeurs ne sont valables que pour le courant nominal i_o indiqué, pour $\bar{i} < i_o$, L est supérieur, tandis que pour $\bar{i} > i_o$, L décroît en général très rapidement. Les valeurs de L utilisées pratiquement sont de l'ordre d'une dizaine de henry. Les condensateurs de l'ordre de quelques dizaines de μF (10 à 20 μF). Signalons au passage le danger des condensateurs chimiques, qui plus intéressants au point de vue encombrement que les condensateurs au papier, conduisent parfois à des explosions dévastatrices (cas de C en tête) lors d'un court-circuit accidentel entre cathode et plaque de la valve. D'une façon générale, les chimiques, bien que séduisants à certains points de vue, sont à éviter chaque fois que cela est possible. Enfin, dans le cas d'un redressement avec un C en tête, il ne faut pas augmenter exagérément la valeur de C, sinon à la mise en marche, l'appel de courant est trop violent et détériore la cathode du tube.

Dans le cas du redressement, l'angle d'ouverture optimum est de l'ordre de 60 à 80°, permettant ainsi les rendements de l'ordre de 75%.

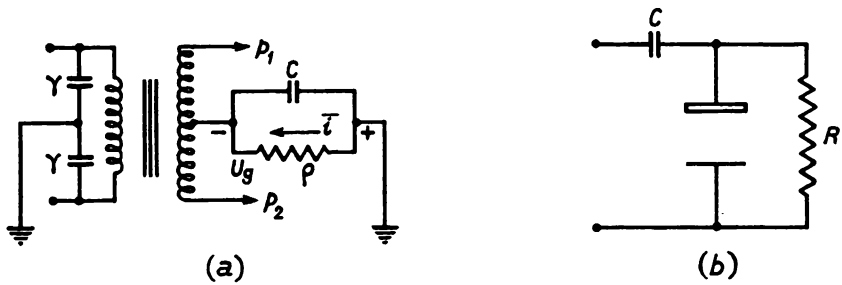


Fig. 22. - a) Tension négative par retour b) Inversion diode-capacité.

- Ordre de grandeur à donner à σ : La valeur à donner à σ peut varier beaucoup d'un montage à un autre. Elle est fonction de la sensibilité de l'appareil d'utilisation. Le rapport signal/bruit (S/b) peut intervenir également. Indiquons cependant que pour une haute tension plaque $\sigma = 3/2\ 10^{-3}$ est un ordre de grandeur raisonnable, pour une tension de polarisation de grille, il faut descendre beaucoup plus bas $\sigma = \frac{1}{2}\ 10^{-5}$ par exemple.

En ce qui concerne les polarisations de grille, indiquons indépendamment de la polarisation automatique que l'on

peut - lorsque $\bar{i}$ est constant - obtenir une tension négative par le retour de $\bar{i}$ (fig. 22-a). Dans ce cas ρ se détermine aisément ($\rho = U_g/\bar{i}$), la valeur de C ($I/C\omega$ ou $1/2\ C\omega \ll \rho$) est déterminée par le fait que la tension développée par la composante fondamentale I_1 (ou I_2) de i doit être telle que $I_1/C\omega$ (ou $I_2/2C\omega$) soit très faible par rapport à U_g, c'est-à-dire que l'ondulation est $I_1/C\omega\ \rho\bar{i} \ll \bar{i}$ (10^{-5} par exemple).

Enfin dans ce cas, il ne faut pas oublier que la tension totale à produire est alors $U' + U_g$.

- Caractéristiques rencontrées dans la pratique :

Les constructeurs donnent fréquemment (en particulier dans le cas de la détection) la caractéristique courant redressé en fonction de la tension redressée, pour différentes valeurs de E (fig. 23) (réseau des caractéristiques dynamiques de redressement). Le tracé de la droite de charge Δ de pente I/R donne alors U pour E et R connus, d'où cos α_0.

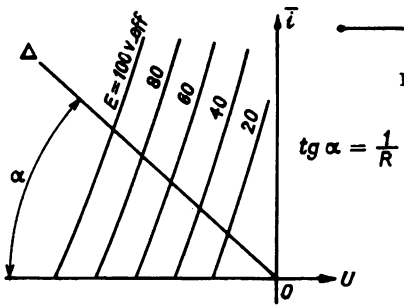


Fig. 23. - Réseau des caractéristiques dynamiques de redressement.

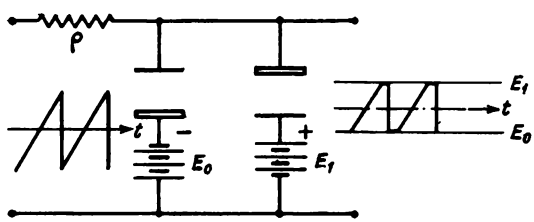


Fig. 23a. - Ecrêtage par diodes parallèles.

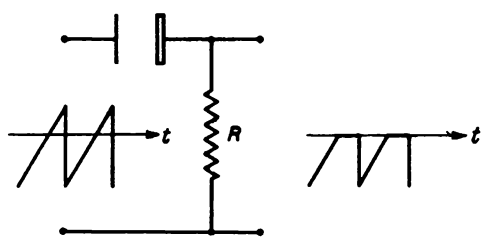


Fig. 23b. - Ecrêtage par diode série.

Dans le cas également de la détection, indiquons le montage de la fig. 22-b, où diode et C ont été inversés, les résultats précédents restent valables, mais le montage permet dans le cas d'une source constituée par un CO monté dans la plaque d'un tube,

d'éliminer la composante continue de la tension mesurée. Ce montage est celui des voltmètres à lampes.

- Remarques :

1) En ce qui concerne la constante de temps du système détecteur, on peut noter le point suivant d'une certaine importance dans la détection de signaux rectangulaires par exemple : pendant les intervalles de temps où la diode est conductrice (charge de C), la constante de temps du système est celle constituée par la résistance interne R_i du tube en série avec C, tandis que lorsque le tube est bloqué (décharge de C) c'est celle du circuit parallèle RC. Ainsi il existe en fait deux constantes de temps pour le système.

2) Dans le cas où l'on a à détecter une onde HF modulée, la fréquence supérieure de modulation étant ω, on devra donner à RC une valeur telle que

$$\frac{2\pi}{\Omega} \ll RC \ll \frac{2\pi}{\omega}$$

Ω étant la pulsation de la porteuse, de façon que la détection puisse suivre la modulation.

3) En plus des limitations déjà indiquées, signalons une limitation supplémentaire très importante pour la vie du tube : la cathode est portée au potentiel U par rapport à la masse, de sorte que lors de l'alternance négative de l'excitation correspondant au blocage du tube, la tension entre cathode et plaque passe par un maximum égal à E + U soit sensiblement 2 E constituant la tension inverse de crête. Cette tension inverse devra être inférieure à celle indiquée par le constructeur comme limite supérieure.

Détecteurs à cristaux.

Leurs caractéristiques sont assez voisines de celles des diodes à vide (dans le sens direct). Toutefois leur résistance interne est plus faible que pour les diodes (généralement inférieure à 100 Ω), et d'autre part, leur courant inverse n'est pas nul (la résistance interne dans le sens inverse est de l'ordre de 10 fois celle du sens direct). Les avantages principaux qui les font préférer dans certains cas (H.F.) sont :

- une capacité parallèle très faible, inférieure au pf (de quelques dixièmes de pf à 1 pf).

- une résistance équivalente de bruit plus faible (de l'ordre de grandeur de la résistance interne).

- un temps de transit plus faible.

Par contre, ils sont fragiles et très sensibles aux surcharges et aux variations de température.

Autres utilisations des diodes

Si le redressement et la détection constituent les principales utilisations des diodes, ils n'en sont toutefois pas les seuls. On

pourrait fort bien imaginer, par exemple, un doublage de fréquence par double diode, d'après les spectres indiqués plus haut

Un autre exemple d'utilisation est fourni par l'écrêtage par diode, comme indiqué fig.23-a (limiteur). Il a l'inconvénient de nécessiter des tensions de polarisation séparées; c'est pourquoi, on lui préfère souvent un écrêtage par triode ou pentode. ρ est ici une résistance élevée destinée à accroître artificiellement la résistance interne de la source située en amont, de façon à faire blocage au moment où les diodes débitent, faisant ainsi chuter la tension. La fig. 23-b donne un autre exemple d'écrêtage, mais par diode série.

LES TUBES AMPLIFICATEURS

Caractéristiques des triodes et pentodes

En plus des paramètres déjà indiqués pour les diodes, l'introduction de grilles supplémentaires conduit à définir de nouveaux paramètres à partir des courbes caractéristiques.

Ces courbes se groupent en trois réseaux (1) (fig. 24-a, b)

1) Réseau plaque (réseau de Kellog)

$I_p = f(V_p)$ à V_g = Cte (V_{g_1}, V_{g_2}, et V_{g_3} = Ctes pour les pentodes).

2) Réseau grille

$I_p = f(V_g)$ à V_p = Cte (V_p, V_{g_2} et V_{g_3} = Ctes pour les pentodes).

3) Réseau à courant constant

$V_p = f(V_g)$ à I_p = Cte (I_p, V_{g_2} et V_{g_3} = Ctes pour les pentodes).

Le dernier n'est généralement pas donné dans les catalogues. A partir d'un seul réseau, on peut déduire les deux autres.

Ils permettent de définir les trois paramètres suivants :

1) Résistance interne

R_i en ohms, $R_i > 0$ ($1/R_i$ = conductance de plaque)

$1/R_i = dI_p/dV_p$ à V_g = Cte

2) Pente (ou transconductance)

p en mA/V ou en μmohs, $p > 0$

$p = dI_p/dV_g$ à V_p = Cte

(1) Les différents indices utilisés sont les suivants :
c ou k pour cathode, g ou g_1 pour grille de commande, g_2 ou e pour grille écran et g_3 pour grille d'arrêt dans le cas des pentodes, p pour plaque. i et v ou I et V sont respectivement les courant et tension correspondants. Les potentiels sont toujours rapportés à la cathode.

3) Coefficient d'amplification

μ sans dimension > 0

$\mu = -d\ V_p / dV_g$ à I_p = Cte

μ, p et R_i sont ainsi définis autour d'un point (point de fonctionnement). Pour les triodes, p et R_i varient d'un point à un autre, alors que μ est constant dans un grand domaine (fig. 24-a). Pour les pentodes, ces trois paramètres sont sensiblement identiques à eux mêmes dans de très grandes limites.

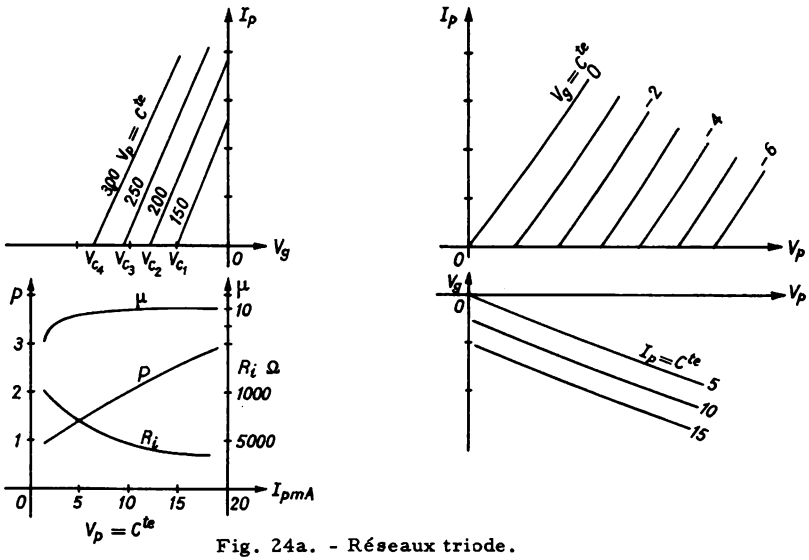
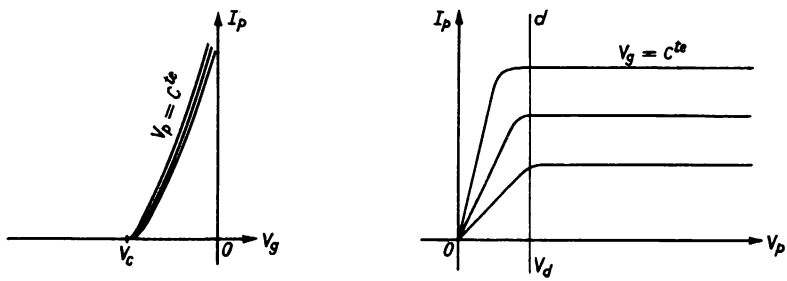


Fig. 24a. - Réseaux triode.



Fib. 24b. - Réseaux pentode.

Le réseau I_p, V_g permet de définir les points d'annulation du courant plaque pour différentes valeurs de la tension plaque (cut-off) = Vc_1, Vc_2, Vc_3 ... (fig.24-a). Dans le cas des pentodes, le cut-off Vc est unique (fig.24-b).

Les puissances maxima dissipables sur chaque électrode s'introduisent naturellement :

P_{pmax} pour la plaque, P_{g_2max} pour l'écran et P_{g_1max} pour la grille de commande, dans le cas d'un tube de puissance.

Les capacités interélectrodes C_{gc} , C_{pc} et C_{gp} sont d'une grande importance en ce qui concerne l'amplification, surtout la dernière (Voir impédance d'entrée - facteur de mérite).

Une autre grandeur d'une grande importance pratique dans certains cas est la résistance équivalente de bruit du tube.

Enfin, un dernier point - se manifestant pratiquement d'une façon indirecte - est le degré de vide du tube. Le vide étant toujours imparfait, au courant électronique se superpose un courant ionique capté par la grille g_1 négative. Ce courant est cause d'instabilité et modifie par ailleurs les tensions de polarisation dans le cas de résistance de grille élevée.

Ces différents points, simplement signalés ici, se retrouvent dans ce qui suit, où leur importance apparaîtra mieux.

Différents régimes de fonctionnement des tubes

On peut en premier lieu caractériser le régime de fonctionnement d'un tube (triode ou pentode) selon son rôle :

a) amplificateur de tension;

b) amplificateur de puissance.

A ces deux rôles correspondent différents régimes proprement dits de fonctionnement.

1) Tube en Classe A (Cl.A) : l'excitation de grille est telle que le courant plaque n'est jamais nul au cours du cycle de grille. La grille est toujours négative (pas de débit grille) et l'on travaille toujours dans les régions rectilignes des caractéristiques.

2) Tube en Classe B (Cl.B) : le tube est polarisé au cut-off V_c , il n'y a de courant plaque que pendant une moitié du cycle de grille dans le cas d'une excitation sinusoïdale. On distingue entre :

- Cl. B1 : il n'y a jamais de débit grille

- Cl. B2 : il y a un débit grille.

3) Tube en classe C (Cl.C) : le tube est dans ce cas polarisé au-delà de V , il n'y a de courant plaque que pendant une fraction du cycle de grille. Pratiquement il y a toujours débit grille.

A ces régimes classiques, on peut ajouter le fonctionnement par "tout ou rien".

Équivalence du circuit plaque - Schémas équivalents a un tube
Gain en tension

Le courant plaque I_p étant une fonction de V_p et V_g soit :

$$I_p = I_p (V_p , V_g)$$

On a :

$$\delta I_p = \left(\frac{\partial I_p}{\partial V_p}\right)_{V_g} \delta V_p + \left(\frac{\partial I}{\partial V_g}\right)_{V_p} \delta V_g$$

soit: $$\delta I_p = \frac{1}{R_i}\,\delta V_p + p\,\delta V_g$$

Si I_p = Cte, on a : $$-\delta V_p / \delta V_g = \mu = p R_i$$

μ, p et R_i sont ainsi liés.

En posant $\delta I_p = i_p$, $\delta V_p = v_p$ et $\delta V_g = v_g$ on a :

$$i_p = \frac{1}{R_i} v_p + p\, v_g \qquad (1)$$

ou : $$R_i\, i_p = v_p + \mu\, v_g \qquad (2)$$

i_p, v_p et v_g sont les variations de I_p, V_p et V_g.

Ainsi d'après (2), le d.d.p. entre cathode et plaque est - pour les variations v_p - la même que celle qui existerait aux bornes d'un générateur de f.e.m. $E = \mu v_g$ et de résistance interne R_i débitant un courant i_p. On a donc le schéma équivalent de la fig. 25-a.

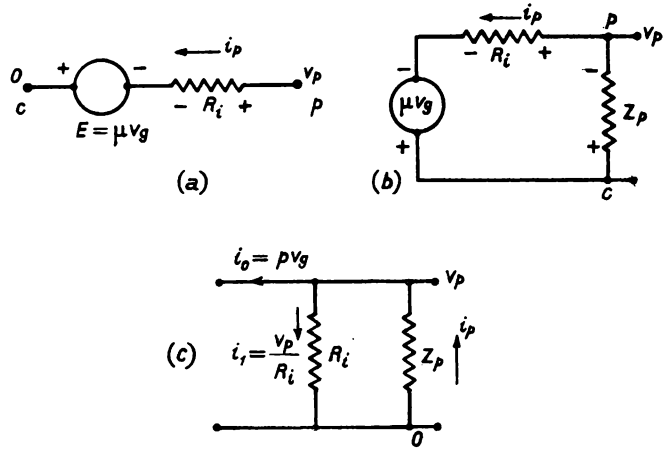


Fig. 25. - Schémas équivalents à un tube.

Si l'on suppose ce générateur fermé sur une impédance Z_p, c'est-à-dire que l'on ait inséré Z_p dans le circuit plaque du tube, on a le schéma de la fig. 25-b équivalent au circuit plaque du tube. Par suite, comme $v_p = -Z_p i_p$ on a :

$$i_p = \frac{p}{1 + Z_p/R_i}\, v_g \quad , \quad p_d = \frac{p}{1 + Z_p/R_i}$$

P_d est la pente dynamique

et $$\frac{v_p}{v_g} = \frac{-\mu}{1 + R_i/Z_p}$$

Si v_g est une tension alternative (variation) appliquée sur la grille du tube, le gain en tension du tube chargé par Z, est pour le point de fonctionnement choisi (μ et R_i déterminés) :

$$g = -\frac{\mu}{1+R_i/Z_p} \qquad (3) \qquad |g| < \mu$$

comme $\mu = pR_i$, on a encore : $g = \dfrac{-p}{\dfrac{1}{R_i}+\dfrac{1}{Z_p}}$ (4)

soit si $1/R_i + 1/Z_p = 1/\rho$ $\qquad g = -p\rho$ (5)

On a évidemment $\rho < Z_p$ d'où l'intérêt d'avoir des tubes de résistance interne élevée de façon à bénéficier intégralement de la valeur de l'impédance de plaque. Les pentodes ont précisément l'avantage de R_i élevées (500 KΩ à 1 MΩ), alors que pour une triode R_i est de l'ordre de quelques dizaines de milliers d'ohms (10 KΩ à 50 KΩ).

Un autre schéma équivalent au tube peut être utilisé, d'après l'expression du gain (4), on a $v_p \cdot (1/R_i + 1/Z_p) + p\, v_g = 0$, soit :

$$\frac{v_p}{R_i} - i_p + pv_g = 0 = i_1 - i_p + i_0$$

Ainsi le tube chargé équivaut au schéma de la fig.25-c, c'est-à-dire à un générateur de courant constant $i_0 = p\, v_g$

Cette représentation met en évidence le fait que la résistance interne du tube shunte la charge de plaque Z_p. En particulier, si Z_p est constitué par CO, on voit que le tube apportera un amortissement supplémentaire du circuit, donc une perte de sélectivité. Dans ce cas, on a encore intérêt à utiliser une pentode. La nécessité des pentodes apparait ainsi du point de vue gain et amortissement créé par le tube. Ce n'est pas là d'ailleurs leur seul intérêt.

Pour les pentodes, comme $R_i \gg Z_p$ dans la très grande majorité des cas, on a $\rho \neq Z_p$ et par suite $g = -pZ_p$.

Les expressions du gain font apparaître un signe moins, celui-ci signifie que v_p est en opposition de phase par rapport à v_g ($v_p = g\, v_g$, avec $g < 0$). Ce fait est tout à fait normal, puisque dans un tube, c'est le courant plaque qui varie dans le même sens que l'excitation grille, la tension de sortie v_p varie en sens inverse du courant puisqu'elle correspond à une chute de tension dans la charge de plaque.

Ainsi, dans un amplificateur à nombre pair d'étages, tensions d'entrée et de sortie seront en phase, il faudra veiller lors du montage à ne pas mettre le dernier tube près du premier, les tensions ayant alors la phase voulue pour provoquer une auto oscillation.

Les schémas équivalents à un tube sont d'une grande importance pratique. Ils permettent une analyse facile d'un réseau donné. Il faut en tout cas ne jamais perdre de vue qu'ils ne représentent le tube que pour les variations des courants et tensions. Certains schémas équivalents se présentent malgré tout sous une forme complexe et pour en faciliter l'analyse, il est souvent

commode de les transformer. Pour cela, on utilise le théorème bien connu de Thevenin :

Etant donné deux points M et N d'un réseau respectivement aux potentiels V_M et V_N et tels que l'impédance du réseau vue de ces deux points, soit Z_{MN} le courant qui circulera dans une impédance extérieure Z_e que l'on placera entre M et N sera tel que $I_{MN} = \frac{V_M - V_N}{Z_{MN} + Z_e}$, c'est-à-dire que le réseau se comportera comme une source de f.e.m. égale à la d.d.p. initiale existant entre M et N, et d'impédance interne égale à l'impédance Z vue initialement entre M et N.

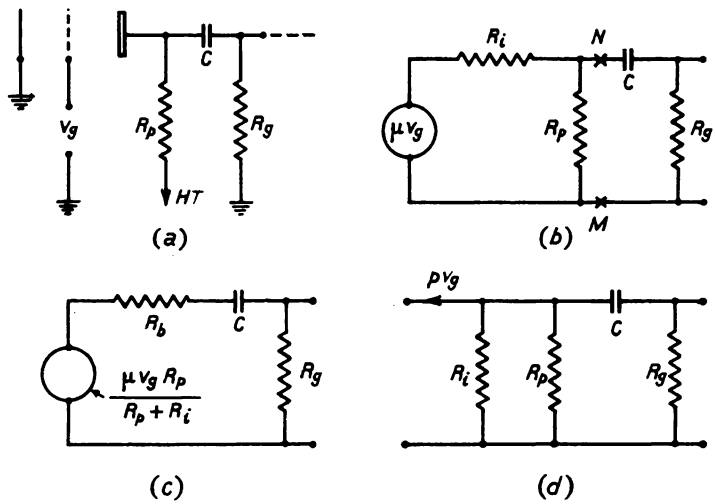


Fig. 26. - Etage amplificateur - Schémas équivalents.

Par exemple, soit un tube chargé par une résistance R_p avec liaison RC à l'étage suivant, le montage est donc celui de la fig. 26-a et le schéma équivalent celui de la fig.26-b. Supposons alors couper ce réseau en M et N, on a pour la partie gauche (source) vue entre M et N

$$V_{MN} = \frac{\mu v_g R_p}{R_i + R_p} \quad \text{et} \quad Z_{MN} = \frac{R_i R_p}{R_i + R_p} = R_b$$

par suite l'introduction entre M et N de l'impédance C, $R_g = R_2$ donne lieu au schéma équivalent de la fig.26-c, plus facile à analyser. En particulier, l'étude de la tension aux bornes de R_2 en fonction de la fréquence (en supposant v_g = Cte) permettrait de retrouver les résultats relatifs au réseau RC.

Si au lieu d'utiliser l'équivalence du tube à un générateur de tension constante, on utilise l'équivalence à un générateur à courant constant, on obtient le schéma de la fig.26-d qui est à rapprocher du réseau RC complexe.

Les schémas équivalents joints à l'équation caractéristique (2) facilitent grandement l'analyse des tubes et de leurs circuits. Par exemple, pour le tube monté, comme l'indique la fig.27,

l'équation caractéristique $R_i p = v_p + \mu v_g$ donnera - les tensions v_p et v_g étant les variations par rapport à la cathode, tandis que v_e, v_k et v_s sont les variations prises par rapport à la masse

$$v_p = v_s - v_k \quad \text{et} \quad v_g = v_e - v_k$$
$$v_p = -i_p (Z_p + Z_k) \quad v_g = v_e - Z_k i_p$$

$$\text{donc } i_p = \frac{\mu v_e}{R_i + Z_p + Z_k(1+\mu)} \quad \text{et comme} \quad v_s = -Z_p i_p$$

$$g = \frac{v_s}{v_e} = \frac{-\mu Z_p}{R_i + Z_p + Z_k(1+\mu)} = \frac{-\mu}{1 + \frac{R}{Z_p} + \frac{Z_k}{Z_p}(1+\mu)}$$

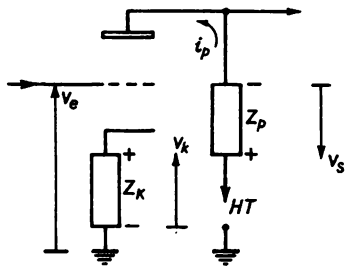


Fig. 27. - Amplificateur avec charges de plaque et de cathode.

La présence de Z_k introduit une contre-réaction.

Les schémas équivalents vus ici ne sont valables qu'en classe A; ils peuvent être étendus aux classes B et C.

Impédances d'entrée et de sortie d'un tube - Modification du gain

Les impédances vues entre grille-cathode (impédance d'entrée Z_e) et plaque-cathode (impédance de sortie Z_s) (1) sont d'une très grande importance, et l'on est contraint d'en tenir compte dans de nombreux cas. La présence des capacités interélectrodes conduit en effet à modifier le schéma équivalent de la fig. 25-a en celui de

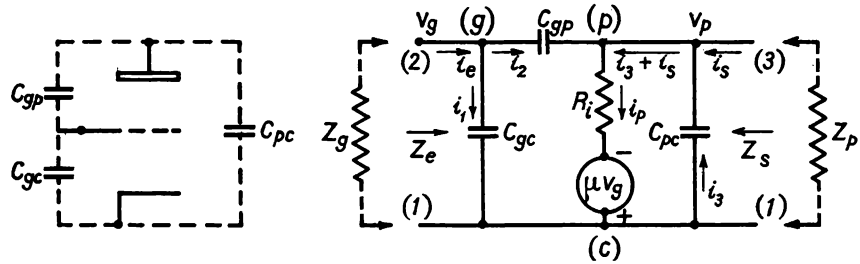


Fig. 28. - Influence des capacités parasites.

la fig. 28 et à tenir compte en plus du courant électronique, des courants capacitifs circulant dans C_{gc}, C_{gp}, C_{pc} qui pour les fréquences élevées peuvent devenir du même ordre que le premier. Ces différentes capacités comprenant les capacités propres des électrodes et en outre celles des diverses connexions tant internes qu'externes, celles du support du tube, etc... Indépendamment de

(1) On suppose ici la cathode à la masse. Sinon Z_e est relatif à l'électrode d'entrée et la masse, et Z_s à l'électrode de sortie et la masse.

cela, C_{pc} n'est pas, même pour les électrodes proprement dites égal à C_{gp} et C_{gc} en série, puisque la grille ne fait pas écran parfait entre p et c.

a. - Impédance d'entrée Z_e.

Dans ces conditions - en supposant que V_g soit toujours négatif (Cl. A), il existe un courant d'entrée i_e égal $i_1 + i_2$, soit : $i = jC_{gc}\,\omega\, v_g + j\,C_{gp}\,\omega\,(v_g - v_p)$ c'est-à-dire que l'impédance d'entrée Z_e (impédance vue entre 1 et 2) est telle que (puisque $v_p/v_g = g$)

$$Z_e = \frac{V_g}{i_e} = j\omega\left[C_{gc} + C_{gp}(1-g)\right]$$

ainsi ce n'est pas seulement C_{gc} qui intervient pous shunter l'entrée du tube, mais également C_{gp} et le gain g (effet Miller) : il y a réaction de la plaque sur l'entrée. Comme g est toujours $< \mu$, il apparaît qu'une limite supérieure de la capacité d'entrée d'un tube est $C_e = C_{gc} + \mu C_{gp}$ soit pour une 6 C 5 (triode) $C_{gc} = 4_{pf}$, $C_{gp} = 1,8_{pf}$, $\mu = 20$ $C_e \# 40_{pf}$.

g pouvant être complexe dans le cas d'une charge Z_p elle-même complexe : $1/Z_p = G - jY$ $g = \frac{-\mu}{1 + R_i\,(G - jY)}$ on a alors :

$$\frac{1}{Z_e} = -\frac{C_{gp}\,\omega\,\mu\,R_i Y}{(1+GR_i)^2 + R_i^2 Y^2} + j\omega\left\{C_{gc} + C_{gp}\left[1 + \frac{\mu\,(1+GR_i)}{(1+GR_i)^2 + R_i^2 Y^2}\right]\right\}$$

en plus d'une capacité d'entrée qui peut être importante, si $Y > O$ il apparaît également dans le circuit grille une résistance négative :

$$R_e = -\frac{(1+GR_i)^2 + R_i^2 Y^2}{\mu\, C_{gp}\,\omega\, R_i\, Y}$$

Y sera > 0 si l'impédance du circuit plaque est selfique, c'est-à-dire dans le cas où Z_p est un CO et la fréquence de travail f_o inférieure à la fréquence propre f_o du CO. L'allure de C_e et R_e dans ce cas est donnée fig. 29. Cette résistance négative qui apparaît à l'entrée peut jouer un rôle considérable puisqu'aussi bien elle crée un désamortissement du circuit éventuellement placé dans la grille; on peut ainsi dans le cas où le circuit grille est lui-même un CO avoir amorçage d'oscillations Dans le cas fréquent où la charge de plaque est une résistance pure R et si la fréquence est suffisamment basse pour que

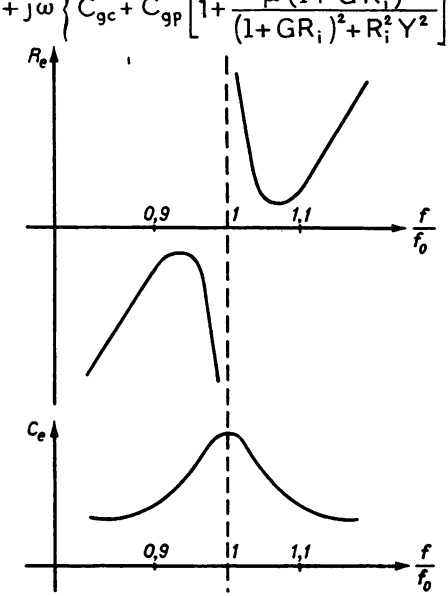


Fig. 29. - Impédance d'entrée d'un tube pour Z_p selfique.

$$R_p \ll \frac{1}{j\omega\,(C_{gp} + C_{pc})}$$

(voir plus loin expression du gain), alors g est réel et c'est une capacité C_e seule qui est ramenée à l'entrée telle que

$$C_e = C_{gc} + C_{gp}\left(1 + \frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R}}\right)$$

soit par exemple la triode 6 C 5 , on a : C_{gc} = 4 pf, C_{gp} = 1,8 pf μ = 20, R_i = 10 KΩ soit $R_p = R_i$ = 10 KΩ on a : $C_e \neq$ 24 pf.

On voit l'intérêt qu'il peut y avoir à diminuer les capacités interélectrodes.

Enfin, si la charge de plaque est une inductance pure (G = 0, Y = 1/L ω) la capacité d'entrée est :

$$C_e = C_{ge} + C_{gp}\left(1 + \frac{\mu}{1 + \frac{R_i^2}{L^2\omega^2}}\right)$$

et la résistance d'entrée (négative) :

$$R_e = -\frac{1 + \frac{R_i^2}{L^2\omega^2}}{\mu C_{gp}\frac{R_i}{L}}$$

pour un tube donné et un point de fonctionnement fixé (R_i déterminé), R_e sera en valeur absolue minimum pour $L = R_i/\omega$ alors $R_e = -\frac{2}{\mu C_{gp}\omega}$ avec la triode précédente (6 C 5) on aurait pour une fréquence f = 100 Kc/s $R_e \neq -100$ KΩ.

On exprime généralement Z_e en fonction de g. Soit en posant $g = -(g_r + j\, g_j)$, (le signe moins correspondant à la rotation de phase entre entrée et sortie) on a :

$$\frac{1}{Z_e} = j\omega\left[C_{ge} + C_{gp}(1 + g_r)\right] - g_j\, C_{gp}\,\omega \ .$$

Si Z_g est l'impédance insérée dans la grille, l'impédance effective entre 1 et 2 sera Z telle que $1/Z = 1/Z_g + 1/Z_e$.

b. - Impédance de sortie Z_s .

C'est l'impédance vue entre 1 et 3. Le courant de sortie i_s est:

$$i_s = i_p - i_2 - i_3 = \frac{\mu v_g + v_p}{R_i} - (v_g - v_p)\, j\, C_{gp}\,\omega + v_p\, j\, C_{pc}\,\omega$$

d'où

$$\frac{1}{Z_s} = \frac{i_s}{v_p} = \frac{v_g}{v_p}\left[p - jC_{gp}\omega\right] + \frac{1}{R_i} + j\,\left(C_{gp} + C_{pc}\right)\omega$$

si Z_g est l'impédance de grille, on a : $i_2 = -\left(\frac{1}{Z_g} + j\, C_{gc}\,\omega\right) v_g$

et comme également $i_2 = (v_g - v_p)\, j\, C_{gp}\,\omega$

$$\frac{v_p}{v_g} = \left[\frac{1}{Z_g} + j\,\left(C_{gc} + C_{gp}\right)\omega\right]\frac{1}{j\, C_{gp}\,\omega} \ .$$

Si la fréquence est assez basse, on peut négliger le premier terme dans l'expression de $1/Z_s$ et on a pratiquement :

$$\frac{1}{Z_s} = \frac{1}{R_i} + j\,(C_{gp} + C_{jc})\,\omega$$

c'est-à-dire que l'impédance de sortie du tube correspond à la mise en parallèle de R_i C_{gp} et C_{pc}. Si Z_p est inséré dans la plaque, l'impédance effective entre 1 et 3 est Z tel que $1/Z = 1/Z_p = 1/Z_s$.

c. - Influence des capacités parasites sur le gain.

Le schéma équivalent au tube fig.28 se réduit du point de vue du gain à celui de la fig.30-a ou encore à celui de la fig.30-b, en posant $1/Z'_p = 1/Z_p + jC_{pc}\omega$, on a $R_i\, i_p = v_p + \mu\, v_g$

avec $$i_p = i_2 + (i_s + i_3) = j\,C_{gp}\,\omega\,(v_g - v_p) - \frac{v_p}{Z'_p}$$

soit : $$\frac{v_p}{v_g} = g = \frac{-(\mu - j R_i C_{gp}\omega)}{1 + R_i\left[\frac{1}{Z_p} + j\,(C_{pc} + C_{gp})\,\omega\right]}$$

ainsi du point de vue du gain, le tube apparaît sous la forme du schéma équivalent de la fig.30-c. C'est le schéma équivalent vu du côté de la plaque. Le μ effectif devient complexe et la charge de plaque correspond à Z_p, C_{gp} et C_{pc} en parallèle.

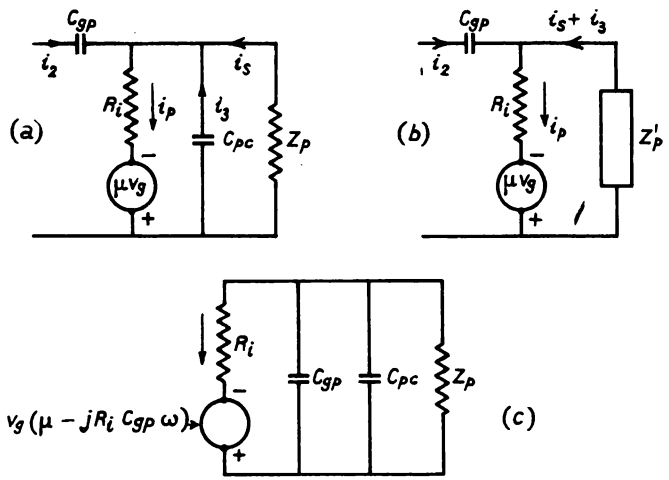


Fig. 30. - Influence des capacités parasites sur le gain.

L'amplification d'un signal HF exige que l'on tienne compte de ces différents effets parfaitement négligeables dans le cas des basses fréquences. Que l'amplificateur à réaliser soit à large bande ou au contraire, sélectif, la question reste identique : les tubes utilisés n'interviendront pas seulement par leur μ mais d'une façon beaucoup plus complexe puisqu'aussi bien entrée et sortie réagissent l'une sur l'autre.

Utilisation des réseaux - Caractéristiques dynamiques (fig. 31)

Si V_{po} est la haute tension appliquée au tube, R_p sa charge de plaque et I_{po} le courant plaque, la tension effective sur la plaque (en l'absence d'excitation-grille) est - pour une polarisation V_{go}

déterminée - $V_p = V_{po} - R_p I_{po}$ relation qui définit dans le réseau plaque une droite Δ de pente $-1/R_p$, Δ est la droite de charge. Le point de fonctionnement du tube est quelque part sur Δ, comme on est sur la caractéristique correspondant à V_{go}, le point de fonctionnement du tube est en P, c'est le point de repos. Si on applique à la grille une tension d'excitation sinusoïdale d'amplitude ΔV_g, on parcourt la portion MN de Δ, la portion MN est la caractéristique dynamique de plaque, le courant moyen de plaque $\bar{i}_p$ est différent de I_{po} courant de repos. Le point moyen est en Q. Cela tient à ce que les courbes $I_p (V_p)$ correspondant à différents V_g ne sont pas équidistantes. La tension moyenne de plaque est $\bar{v}_p = V_{po} - R_p \bar{i}_p$. On a tracé sur le réseau l'hyperbole de dissipation maximum $P_{p\,max}$, la puissance moyenne dissipée sur la plaque est $\bar{v}_p \bar{i}_p$. Le point moyen Q doit être au-dessous de l'hy-

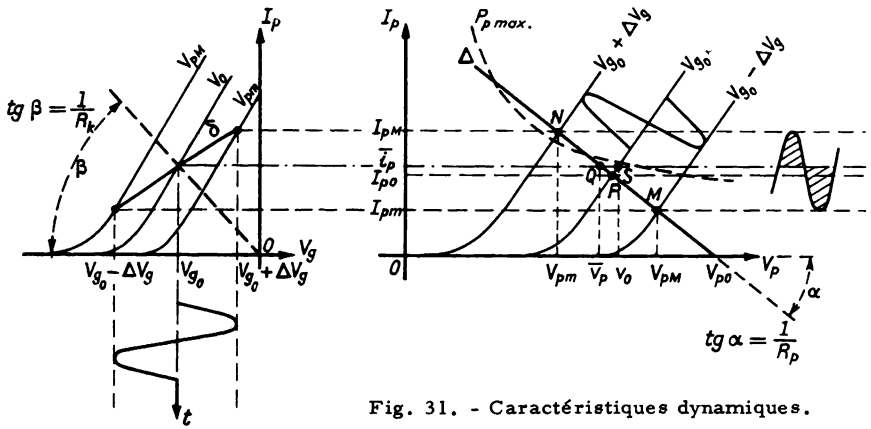


Fig. 31. - Caractéristiques dynamiques.

perbole, mais on peut en valeur instantanée passer dans la région supérieure du plan, sous réserve dans le cas où l'on a des impulsions par exemple que le courant demandé alors à la cathode reste inférieur à la valeur maximum admissible, c'est-à-dire que l'on n'a pas le droit de passer au-dessus de $I_{p\,max}$. De même dans le cas où l'excitation grille porte la grille à des potentiels négatifs supérieurs en valeur absolue à V_c (cut-off), le tube étant alors bloqué, toute la haute tension V_{po} se trouve appliquée sur la plaque, les claquages internes peuvent se produire si $V_{po} > V_{pmax}$. Finalement, soit en valeur moyenne, soit en valeur instantanée, le tube se trouve limité dans son fonctionnement à une région bien déterminée du plan $I_p V_p$ (fig.32-a). Dans le cas où des questions de distorsion sont à considérer, on ne peut alors descendre au-dessous d'une certaine droite D, le domaine dans lequel le tube doit travailler est ainsi réduit.

On peut remarquer : 1 - que les puissances moyennes, fournies par la source $P_o = V_{po} \bar{i}_p$, dissipée dans R_p, $P_R = (V_{po} - \bar{v}_p) \bar{i}_p$, et sur la plaque $P_p = \bar{v}_p \bar{i}_p$ sont représentées par les 3 rectangles de la fig.32-b.

2 - que la caractéristique dynamique de plaque est une droite dans $I_p V_p$ cela tient à ce que V_p et I_p sont liés par la loi d'Ohm; il en est différemment dans le réseau I_p, V_g, pour la caractéristique dynamique δ car I_p et V_g ne sont pas liés linéai-

rement du fait des distorsions du tube. On peut construire graphiquement δ à partir de Δ (ou la calculer point par point). On a donc intérêt du point de vue pratique à travailler - pour une triode - sur le réseau plaque, car dans ce cas, la caractéristique dynamique est toujours une droite quelque soit le régime dans lequel travaille le tube.

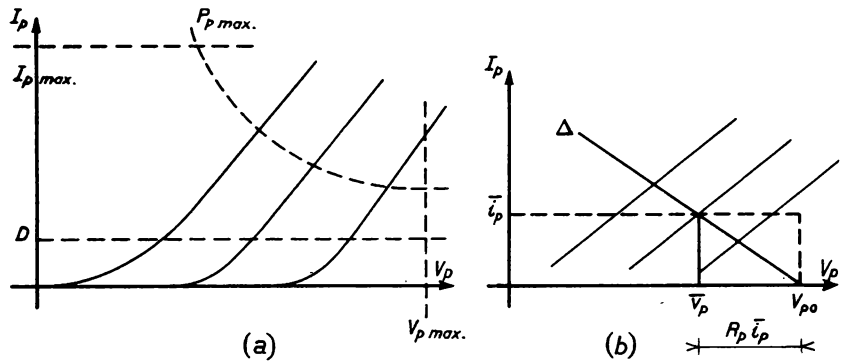


Fig. 32. - a) Domaine d'utilisation d'un tube. - b) Rectangles de puissance.

- CHOIX DE R_p

Le gain en tension étant $g = \frac{-\mu}{1 + R_i/R_p}$ on a en principe intérêt à augmenter le plus possible R_p pour bénéficier au maximum du μ du tube. En fait, cela revient à incliner davantage sur OV_p la droite de charge Δ. Il s'ensuit des distorsions beaucoup plus importantes pour v_p. On est donc ainsi limité pour un tube donné sur la valeur de R_p. Pratiquement, on prendra $R_p = 3$ ou $4\,R_i$ au maximum. Il s'ensuit que le gain maximum en tension que l'on peut pratiquement obtenir d'une triode est de l'ordre de $g_{max} = -4\,\mu/5$.

Du point de vue gain en tension, la qualité d'une triode est caractérisée par la valeur de μ. g ne serait égal à μ que si R_p était infini ou à tout le moins très grand devant R_i, mais si R_p croît I_p diminue et μ décroît (fig. 24-a), ceci indépendamment des distorsions.

Cas ou la charge de plaque est une résistance pure de valeurs différentes en statique et en dynamique.

1) Cas d'un CO. Du point de vue continu, le circuit se comporte comme une résistance pure r, le point de repos est donc en P (fig. 33-a). Mais en supposant le CO accordé sur la fréquence d'excitation grille, celui-ci équivaut du point de vue dynamique à une résistance R_p élevée et la droite de charge est Δ différente de d.

2) Cas d'une charge ramenée par transformateur. Si la charge secondaire est R et si la tension alternative aux bornes est en valeur efficace V_2, la puissance cédée à R est V_2^2/R en supposant

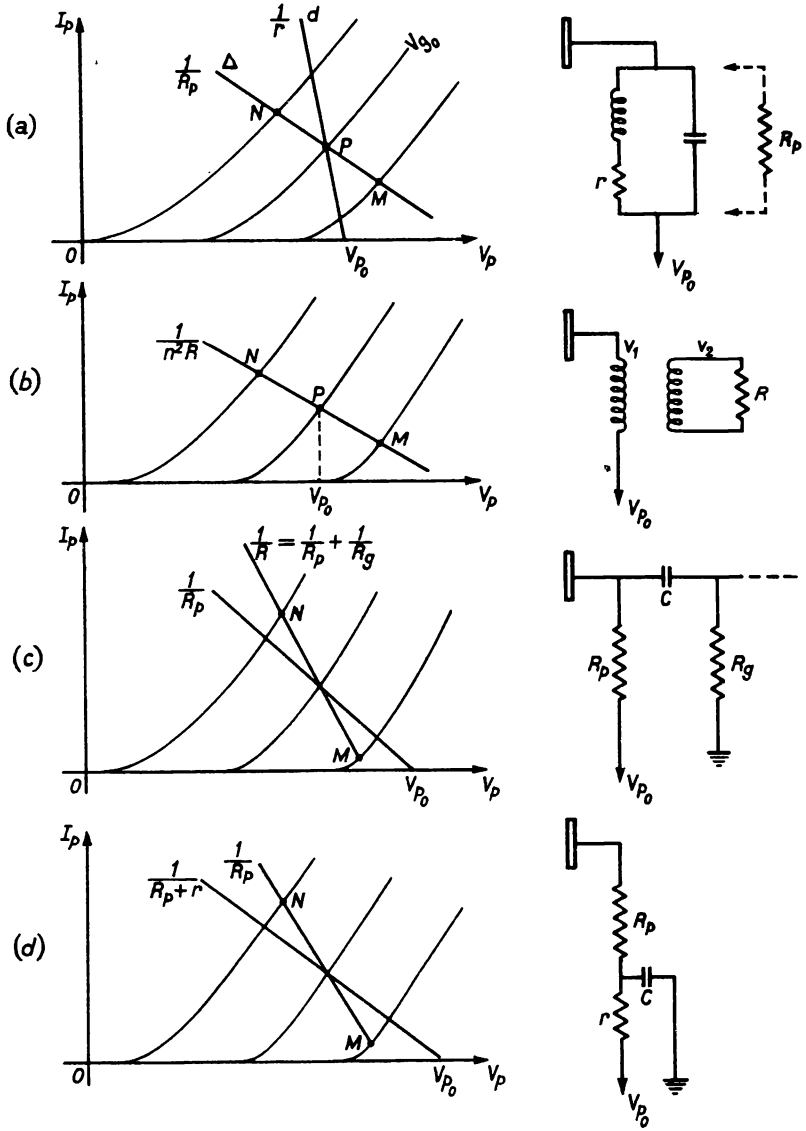


Fig. 33. - Caractéristiques dynamiques pour différentes charges.

le transformateur parfait, cette puissance est fournie par le primaire où la tension alternative efficace est V_1 . La charge équivalente pour le primaire est donc R_p tel que $V_1^2/R_p = V_2^2/R$. Si $V_1/V_2 = n$, rapport de transformation $R_p = n^2 R$. Si R est faible, alors $V_2 < V_1$ et $n > 1$. Du point de vue alternatif, la charge du circuit plaque est $n^2 R$ mais en continu elle est r (résistance du primaire) pratiquement négligeable devant R_p. On a donc la caractéristique de la figure 33-b.

3) Cas d'une charge R_p avec liaison capacitive à l'étage suivant.

C'est la liaison classique dans ce cas, en continu, la charge est R_p, alors qu'en alternatif elle est R telle que $I/R = I/R_p + I/R_g$ en supposant C négligeable à la fréquence considérée d'où la caractéristique fig.33-c (la grille du 2ème tube est supposée ne pas débiter).

4) Influence des élements de découplage. On a fréquemment le montage de la fig. 33-d. Dans ce cas, R est encore différent en continu et en alternatif, la droite de charge est celle de la fig. 33-d.

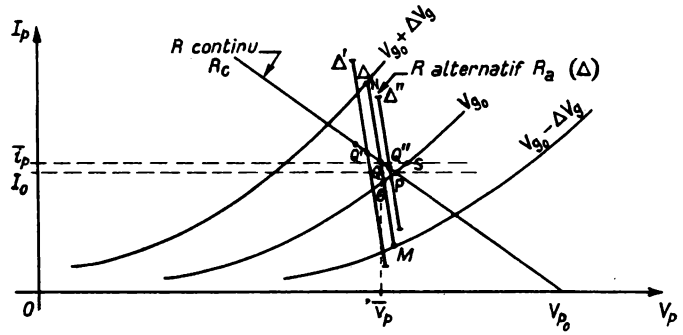


Fig. 34. - Influence de la courbure des caractéristiques.

Remarque : On a supposé ici le réseau idéalisé en assimilant les différentes caractéristiques à des droites parallèles équidistantes, ce qui fait que le courant de repos I_{po} et le courant moyen $\overline{i_p}$ sont confondus. En fait, sur un réseau réel, on aurait la construction de la fig.34 où l'on a P, point de repos, Q, point moyen, O, point correspondant au passage par zéro de l'excitation ($v_g = \Delta V_g \cos \omega t = 0$). On a en effet $i_p = \overline{i_p} + i_{pa}$ où i_{pa} est l'ensemble des harmoniques de i_p, c'est-à-dire $\overline{i_{pa}} = 0$. Donc $v_p = V_{po} - R_c \overline{i_p} - R_a i_{pa}$ (R_c = résistance en continu, R_a = résistance en alternatif) $\overline{v_p} = V_{po} - R_c \overline{i_p}$ est une droite passant par $\overline{v_p}$, $\overline{i_p}$ et de pente $-1/R_c$ et $v_p - \overline{v_p} = R_a i_{pa} = -R_a (i_p - \overline{i_p})$ passe par $\overline{v_p}$ et $\overline{i_p}$ (pente $-1/R_a$) la fig.34 correspond à $R_a < R_c$ (cas 3). Dans le cas d'excitations différentes, la droite Δ devient Δ' pour $\Delta V'_g > \Delta V_g$ et Q vient en Q', tandis que pour une excitation moindre Δ vient en Δ'' et Q en Q'' se rapproche de P, ceci tient au fait que I_{po} reste toujours le même alors que $\overline{i_p}$ dépend de l'excitation. Les droites Δ, Δ' et Δ'' restent parallèles entre elles et sont plus ou moins parcourues.

Amplificateur de puissance cl.a - Rendements - Choix du tube

L'amplificateur de puissance Cl.A a un très mauvais rendement. Toutefois, lorsqu'il est nécessaire de conserver au signal sa forme et qu'en outre on lui demande d'actionner un organe quelconque, c'est-à-dire de fournir une certaine puissance, on ne peut faire autrement que de travailler en Cl.A.

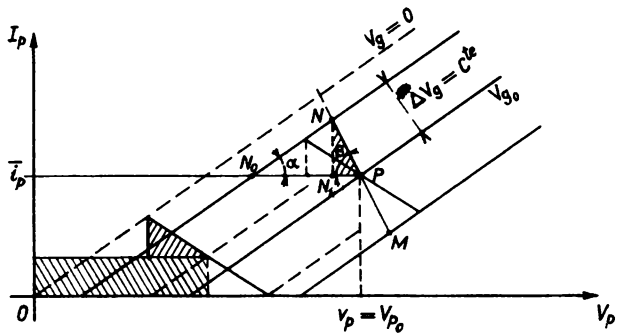
Dans ce cas, le problème se présente pratiquement sous la forme d'une charge R (organe extérieur à commander) couplé par transformateur au tube chargé de fournir la puissance. La caractéristique dynamique est connue ($n^2 R$).

Le problème peut se présenter de deux façons.

1) On ne dispose que d'une tension d'excitation grille ΔV_g limitée : fig. 35-a.

Les amplitudes alternatives sont ΔI_p = NN et ΔV_p = PN_1, la puissance utile $P_u = 1/2\ \Delta V_p . \Delta I_p$ = aire $P'NN_1$; PNN_1 est le triangle de puissance. $P_u = 1/2 . P N_1 . N N_1 = 1/2\ P N_1 . N_0 N_1 . \operatorname{tg}\alpha$, $\operatorname{tg}\alpha = I/R_i$ comme $P N_1 + N_0 N_1$ = Cte (puisque ΔV_g fixe : $P N_0$ = Cte) P_u sera maximum lorsque $P N_1 = N_0 N_1$ c'est-à-dire $\alpha = \beta$ soit $n^2 R = R_i$.

(a)



(b)

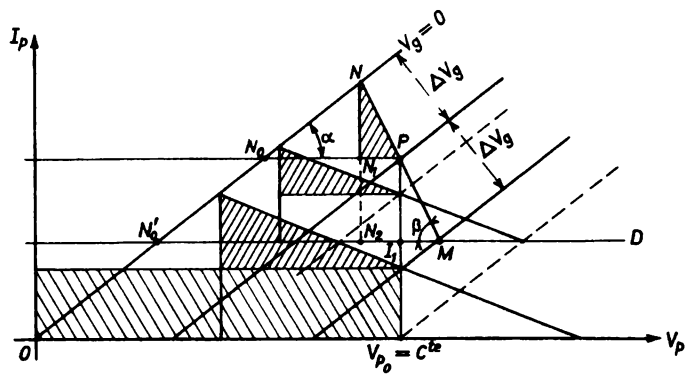


Fig. 35. - Amplificateur de puissance Cl. A.

La puissance fournie par la source HT étant $P_o = V_{p_0} \overline{i_p}$ sera minimum pour P le plus voisin de O possible, c'est-à-dire en faisant abstraction de D pour M sur OV_p et N sur $V_g = O$. Le rendement est ainsi à la limite $\eta_{lim} = 1/6$, évidemment très faible.

2) On dispose de l'excitation: fig. 35-b .

On a par exemple la possibilité de faire précéder l'étage de puissance d'un tube amplificateur de tension. Mais la H.T. V_0 est imposée pour des raisons de montage par exemple. P_u sera

alors maximum lorsque N sera sur la caractéristique $V_g = O$ et M sur D, ceci avec une charge $n^2 R$. V_{po} étant donné, on a $P_1\ N_0' = Cte$.

$P_u = 1/2\ N N_1 . P N_1 = 1/4 . N N_2 . P N_1 = 1/4\ N_0' N_2 . tg\alpha . P_1 N_2$ $N_0'\ N_2 + N_2\ P_1 = Cte$; P_u est maximum pour $N_0'\ N_2 = N_2\ P_1$, alors $tg\beta = 1/2\ tg\alpha$ c'est-à-dire $n^2 R = 2 R_i$. M est alors symétrique de N_2 par rapport à P_1. Dans le cas où l'on fait abstraction de D, P_o est minimum pour M sur OV_p. Dans ce cas, on a $\eta_{lim} = 1/4$, c'est encore faible.

L'amplification en puissance Cl.A a un rendement déplorable; elle n'est à utiliser que lorsqu'il est indispensable de conserver au signal sa forme.

Il reste à choisir le tube. Pour cela, on peut se guider de la façon suivante : comme $P_u = 1/2\ \Delta V_p . \Delta I_p = 1/2\ \Delta V_p^2 . 1/n^2 R$ et que $\Delta V_p = [-\mu n^2 R/(n^2 R + R_i)] . \Delta V_g$, en posant $n^2 R = k R_i$ (k = 1 ou 2).

$$P_u = \frac{\Delta V_g^2}{2} \frac{k}{(k+1)^2} \mu p$$

Si ΔV_g est fixé (k = 1), $P_u = \frac{\Delta V_g^2}{8} \mu p$ comme P_u est toujours connu le tube choisi devra avoir un μp suffisant. De plus comme $\eta_{lim} = 1/6$, il faudra qu'il puisse dissiper au minimum $P_p = P_0 - P_u = 5 P_u$.

Si c'est V_{po} qui est fixé (k = 2), $P_u = \frac{\Delta V_g^2}{9} \mu p$ en remarquant que dans le cas limite $3/2\ V_{po} = 2 \mu . \Delta V_g$ soit $P_u = V_{po}^2 /16 R_i$ on a le R_i nécessaire. Ici $\eta_{lim} = 1/4$, le tube devra pouvoir dissiper $P_p = 3 . P_u$.

Ces données constituent des limites, il convient de se donner une marge de sécurité. Toutefois, on peut ainsi éviter de choisir un tube qui ne pourra jamais effectuer l'amplification (ou au contraire un tube surabondant).

Distorsions introduites par les amplificateurs

Du point de vue signal, on peut les classer en trois catégories:

1) Distorsions d'amplitude : il n'y a pas entre entrée et sortie une relation linéaire. Il y a alors création d'harmoniques par le système.

2) Distorsions de fréquence : C'est le cas où la gain n'est pas constant dans toute la bande de l'amplificateur.

3) Distorsions de phase : il y a alors modification des phases relatives des différentes composantes du signal.

Les qualités d'un amplificateur se déduisent de ces trois points.

Du point de vue des causes de distorsion, on peut en distinguer deux :

a) Distorsions linéaires : Ce sont celles introduites par les éléments R L C des circuits. Elles correspondent à 2) et 3) (impédance du réseau, fonction de la fréquence).

b) Distorsions non linéaires : Elles sont introduites par les caractéristiques courbes des éléments employés (tubes, hystérésis et saturation des circuits magnétiques).

Une distorsion linéaire peut d'ailleurs entraîner une distorsion non linéaire. C'est le cas par exemple d'une charge de plaque fonction de la fréquence (distorsion linéaire), mais la variation de Z_p entraîne alors une modification de la droite de charge, donc de la caractéristique dynamique (distorsion non linéaire), c'est le des fig. 33 e et d par exemple.

DÉTERMINATION GRAPHIQUE DES DISTORSIONS INTRODUITES PAR UN TUBE (Fig. 36)

On peut, à l'aide du réseau I_p V_p déterminer les différents taux de distorsion. Δ et δ étant les caractéristiques dynamiques. En écrivant δ sous la forme :

$$i_p = I_{po} + \alpha v_g + \beta v_g^2 + \gamma v_g^3 \text{ avec } v_g = \Delta V_g . \cos \alpha \text{ ou } \alpha = \omega t$$

on a = courant moyen : $\overline{i_p} = I_{po} + \frac{\beta}{2} \Delta V_g^2$

courant fondamental : $\Delta I_{p1} = \alpha \Delta V_g + \frac{3}{4} \gamma \Delta V_g^3$

harmonique 2 : $\Delta I_{p2} = \frac{\beta}{2} \Delta V_g^2$

harmonique 3 : $\Delta I_{p3} = \frac{\gamma}{4} \Delta V_g^3$

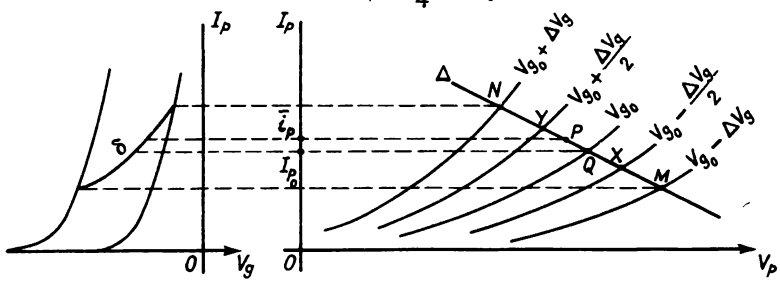


Fig. 36. - Distorsions - Détermination graphique.

Les taux de distorsion $\tau_2 = \frac{\Delta I_{p2}}{\Delta I_{p1}}$ et $\tau_3 = \frac{\Delta I_{p3}}{\Delta I_{p1}}$ sont tels que :

$$\tau_2 = \frac{3}{4} \frac{PN - PM}{MN + XY} \qquad \tau_3 = \frac{1}{2} \frac{MN - 2XY}{MN + XY}$$

enfin Q est tel aue P Q = 1/4. (P N − P M).

EXAMEN OSCILLOGRAPHIQUE DU SIGNAL

Un simple examen à l'oscillographe permet de se rendre compte de la nature et de l'origine des différentes distorsions subies par le signal.

La fig. 37 en donne quelques exemples : le signal est supposé examiné à la sortie du tube (courant plaque ou tension plaque, si la charge est une résistance pure).

a) Un écrêtage par cut-off se traduit par une troncature très franche du signal.

b) Au contraire, un écrêtage par débit grille n'apporte qu'un aplatissement plus ou moins net de la crête du signal.

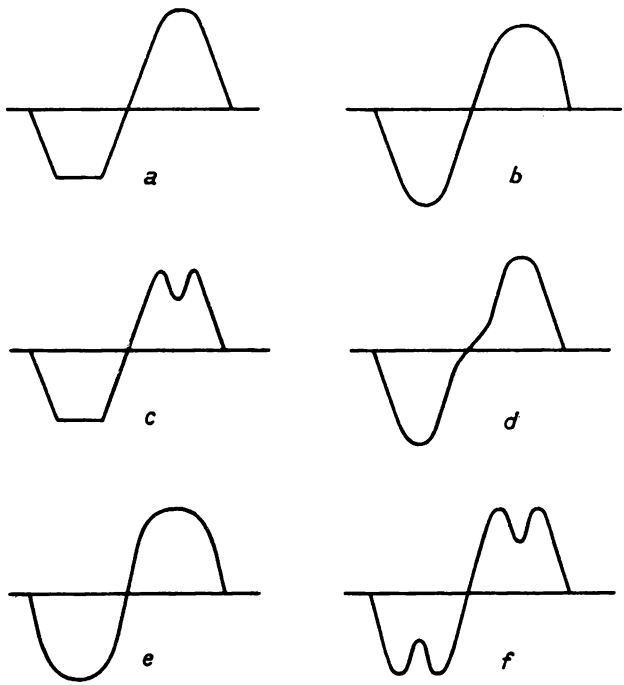


Fig. 37. - Examen oscillographique d'un signal.

c) Une excitation de grille trop violente provoque un écrêtage par cut-off et débit grille. Si l'excitation est très forte, le signal peut avoir l'allure indiquée.

d) La présence d'harmonique 2 se traduit par une distorsion dans la partie centrale du signal et plus particulièrement sur un flanc.

e) Tandis que la présence d'harmonique 3 affecte les sommets du signal, s'il est faible, il n'en résulte qu'un simple arrondissement des crêtes.

f) s'il est très important, il y a creusement des sommets.

LES TUBES MULTIGRILLES

Tétrodes et pentodes

En se limitant à l'amplification en tension, les triodes font ressortir certaines limitations. En particulier, il apparaît nécessaire d'accroître μ pour des questions de gain, d'augmenter parallèlement R_i pour réduire l'amortissement provoqué par le tube, c'est-à-dire finalement de parvenir à des pentes et des résistances internes plus élevées.

Par ailleurs, il est nécessaire pour les fréquences élevées de réduire la capacité d'entrée des tubes, c'est-à-dire les capacités interélectrodes en particulier C_{gp}. Une augmentation de μ sans réduction parallèle de C_{gp} n'apporterait pas de solution en H.F. (1)

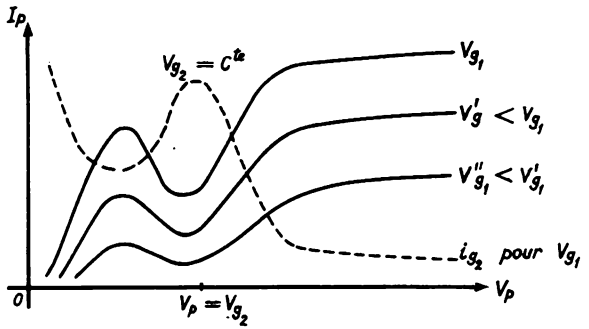


Fig. 38. - Réseau tetrode.

L'introduction d'un écran (grille écran g_2 à laquelle est appliquée une tension positive par rapport à la cathode), entre grille de contrôle g_1 et plaque p permet de réduire C_{gp}. C'est le rôle de la tétrode où C_{gp} peut être réduit jusqu'à quelques millièmes de pf. Parallèlement, il en résulte une augmentation de μ et de R_i. Pour que l'écran joue effectivement son rôle, il est nécessaire que son potentiel soit parfaitement défini; il en résulte que la tension positive qui l'alimente devra être stable et bien filtrée; il devra également être bien découplé du point de vue H.F. L'écran est d'ailleurs une grille comme g_1 et par conséquent, un point délicat du tube. Ces questions restent évidemment valables pour une pentode. La dissipation maximum admissible sur l'écran $P_{e\,max}$ s'introduit naturellement; elle est nettement plus faible que $P_{p\,max}$.

L'introduction de g_2 modifie profondément les caractéristiques I_p V_p du tube (fig. 38). En effet, des électrons secondaires émis par la plaque peuvent, lorsque $V_p < V_{g2}$ être recueillis par l'écran.

---

(1) Dans une triode μ est d'ailleurs fonction des capacités entre les parties actives des électrodes, plus précisément de C^0_{gc} et C^0_{pc}. On a en effet $\mu = C^0_{gc} / C^0_{pc}$, C^0_{gc} et C^0_{pc} - capacité des parties actives – diffèrent de C_{gc} et C_{pc} par les capacités propres des connexions internes, des éléments de montage, etc... C_{gc} et C_{pc} sont supérieurs à C^0_{gc} et C^0_{pc}.

Si le taux d'émission secondaire de la plaque est supérieur à 1, il en résulte dans une certaine région (pour $0 < V_p < V_{g_2}$) une caractéristique correspondant à une résistance interne négative. Cette propriété est utilisée dans certains types d'oscillateurs (oscillateur dynatron). Pour $V_p > V_{g_2}$ le courant plaque devient par contre presque indépendant de V_p. Il en résulte une résistance interne positive élevée. R_i étant alors de l'ordre de 100 KΩ à 500 KΩ et p de l'ordre de quelques m A/V, le μ correspondant est de l'ordre de quelques centaines.

Les variations du courant d'écran I_{g_2} sont inverses de celles de I_p.

Du point de vue amplification l'émission secondaire apparaît comme gênante.

L'introduction d'une grille d'arrêt g_3 (ou suppressor) entre g_2 et p, portée à un potentiel très faible (généralement nul) par rapport à la cathode empêche les électrons secondaires émis par p d'aller vers g_2 (et réciproquement selon les potentiels relatifs de g_2 et p). La caractéristique $I_p V_p$ de la pentode a alors l'allure indiquée fig. 24-b. En plus des courbes indiquées pour la triode, et limitant l'utilisation du tube, la droite d passant par V_d (tension de déchet) s'introduit naturellement pour des questions évidentes de distorsion. La résistance interne du tube est augmentée et R_i peut atteindre facilement le MΩ parfois plus. Dès lors, d'après l'expression même du gain en tension d'un tube, il apparaît que le paramètre qui va caractériser une pentode est sa pente. Elle peut atteindre des valeurs élevées jusqu'à 10 m A/V.

Le courant plaque est très sensiblement indépendant de V_p il en résulte que le réseau de grille se réduit pratiquement à une courbe unique, sauf pour les faibles valeurs de V_p et lorsque V_g est voisin du potentiel de la cathode. Ce fait, d'une caractéristique unique $I_p V_g$ a pour conséquence une caractéristique dynamique δ confondue avec la caractéristique statique. En outre, le potentiel de grille V_c pour lequel I_p s'annule (cut-off) qui était fonction de V_p pour les triodes est ici unique. Il devient une caractéristique du tube au même titre que V_d. Un tube de grande pente a un faible cut-off. Le fait que I_p soit largement indépendant de V_p, évite dans bien des cas de stabiliser la source haute tension; par contre, il n'en est pas de même pour V_{g_2} dont les variations modifient le réseau $I_p V_p$.

On utilise ces différents réseaux de la même façon que pour les triodes : droite de charge, etc...

Alors que pous les triodes $I_c = I_p$, lorsqu'il n'y a pas de débit grille pour les tétrodes et pentodes $I_c = I_p + I_{g_2}$, ce détail est à ne pas perdre de vue dans les polarisations automatiques.

Amplificateurs à large bande utilisant des pentodes

Pratiquement les amplificateurs de tension à large bande sont tous réalisés avec des pentodes. Les raisons s'en comprennent aisément.

a. - Amplificateur RC à large bande.

C'est le plus utilisé. Le tube T_1 est chargé par une résistance pure R_p (fig.39-a). Comme la plaque est portée à un potentiel continu moyen $\overline{v_p}$ qui peut être élevé (100 volts pour V_{po} = 250 Volts par exemple), il ne peut être question de faire une liaison directe à la grille de l'étage suivant. La solution de la liaison directe - amenant en effet de grandes difficultés pratiques - n'est adoptée que lorsqu'il est nécessaire de transmettre la composante continue (amplificateur continu). C'est donc par capacité C (condensateur de liaison) que l'on transmet les composantes alternatives du signal à la grille suivante. Le potentiel de cette dernière doit être défini par rapport à sa cathode à l'aide d'un circuit amenant la polarisation de grille d'une part et, d'autre part, ce circuit doit être tel que la cathode de T_2 soit ramenée d'une façon quelconque au même potentiel alternatif que le pied de R_p. Enfin, ce circuit qui se trouve en parallèle sur R_p ne devra pas modifier la charge de plaque. Pour remplir ces conditions, c'est donc une résistance R_g, grande par rapport à R_p que l'on est amené à introduire dans le circuit grille-cathode de T_2 (résistance de fuite de grille). Au circuit ainsi monté, viennent s'ajouter les capacités C_{pc} de T_1 et C_{gc} de T_2 la capacité C_{gp} de T_2 n'intervenant pas puisque - malgré le gain - C_{gp} étant réduit pour une pentode, la capacité ramenée à l'entrée peut être négligée au moins en première approximation. Finalement, le montage a pour schéma équivalent celui de la fig.39-b.

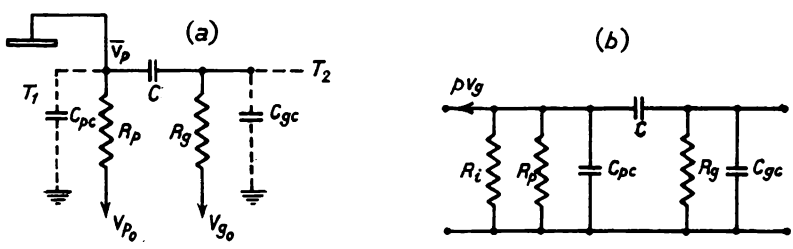


Fig. 39. - Amplificateur RC à large bande.

Ce schéma n'est autre que le réseau R C complexe vu précédemment et l'identification avec les notations employées alors est immédiate.

La fréquence critique haute f_∞ est $f_\infty = \dfrac{1}{2\pi\rho\,(C_{pc} + C_{gc})}$ où ρ est tel que $\dfrac{1}{\rho} = \dfrac{1}{R_i} + \dfrac{1}{R_p} + \dfrac{1}{R_g} \neq \dfrac{1}{R_p}$, c'est-à-dire $f_\infty = 1/2\pi R_p(C_{pc} + C_{ge})$ le gain de l'étage est donc : $g = p\,R_p = \dfrac{p}{2\pi f_\infty (C_{pc} + C_{gc})}$.

Il en résulte que plus la bande est grande (f_∞ élevé) et plus on doit diminuer R_p pour un type de tube donné : $p/(C_{pc} + C_{gc})$ donné (1); le gain obtenu diminue donc lorsque f_∞ croît. A la limite,

(1) On réalise en effet pratiquement un amplificateur à plusieurs étages avec des tubes tous identiques, c'est ainsi que bien que C_{gc} soit relatif à T_2 il est caractéristique de T_1.

le tube perd son intérêt au moment où g = 1. Un tube déterminé ne permet donc pas d'obtenir un gain effectif au-delà d'une certaine fréquence $f_{\infty\,lim}$ telle que: $f_{\infty\,lim} = \frac{p}{2\pi (C_{pc} + C_{gc})}$ cette fréquence est une caractéristique du tube et le facteur $\frac{p}{C_{pc} + C_{gc}}$ est le facteur de mérite du tube. Le tableau 2 donne pour quelques tubes leur facteur de mérite.

TABLEAU II

	Type	p mA/V	Capacité d'entrée Cgc pf	Capacité de sortie Cpc pf	C_{gp} pf	p / (Cgc + Cpc) (radian/s)	f_∞ lim. (Mc/s)
Triode	6 J 5	2,6	3,4	3,6	3,4	$3,7 \cdot 10^8$	59
"	955 (gland)	2	1	0,6	1,4	$1,25 \cdot 10^9$	200
Pentode	6 AC 7	9	11	5	0,015	$5,6 \cdot 10^8$	84
"	EF 42	9,5	9,5	4,5	0,005	$6,8 \cdot 10^8$	108
"	956 (gland)	1,8	3,4	3	0,007	$2,8 \cdot 10^8$	45

Le facteur de mérite est une limite propre au tube, il ne tient pas compte des différentes capacités parasites comme les capacités du support, du câblage, ... qui peuvent accroître C_{pc} et C_{gc}, ni éventuellement de l'influence de C_{gp}.(1)

Pour obtenir un gain déterminé, plus la bande sera grande et plus on sera amené à réduire le gain de chaque étage, donc à multiplier le nombre d'étages. Dans ce cas, la réponse en fréquence de l'ensemble est en valeur relative $\left[\frac{1}{1 + j\, f/f_\infty}\right]^n$ en supposant n étages tous identiques, c'est-à-dire de même fréquence critique f_∞. La réponse transitoire est alors donnée fig. 40 pour différentes valeurs de n. On a porté en abscisse non le temps t, mais le produit $2\pi f_\infty t$ (radian), en ordonnées les amplitudes relatives.

Si par exemple un premier calcul a conduit à adopter n = 5 et si l'on veut passer des fronts raides avec un temps de montée τ = 1 µ s la fig.40 donnant pour n = 5 et 0,99, $2\pi f_\infty t = 2\pi f_\infty \tau$ = 10,5 chaque étage devra avoir pour fréquence critique $f_\infty = 1,67 \cdot 10^6$ soit $f_\infty \neq 2$ M c/s.

b. - Amplificateur à C.O. à accords décalés.

Le gain de l'ensemble de n tubes supposé comporter un C.O. dans leur plaque sera (voir C.O. décalés).

$$g = \prod_{k=1}^{n} \frac{p_k R_k}{\sqrt{1+Q_k^2 y_k^2}} = \frac{\prod_{k=1}^{n} p_k R_k}{K\sqrt{1+\left(\frac{y}{y_1}\right)^{2n}}}$$

où p_k est la pente du tube k et R_k la résistance parallèle du $k^{ième}$ circuit. K représente la réduction du gain dû aux désaccords des différents circuits par rapport à la fréquence centrale f_o, puisque

(1) Les capacités parasites peuvent modifier considérablement le $\frac{p}{C_{gc} + C_{pc}}$ d'un tube. Entre deux tubes de même facteur de mérite on prendra de préférence le tube de plus forte pente.

si $f = f_o$, $y = O$ et $g_o = \frac{\prod_1^n p_k R_k}{K}$, le numérateur étant le gain qui serait réalisé si tous les circuits étaient accordés sur f_o

$$K^2 = 1 + Q_k^2 y_{ok}^2 \qquad y_{ok} = \frac{f_o}{f_{ok}} - \frac{f_{ok}}{f_o}$$

d'après les relations générales relatives aux C.O. à accords décalés, on a : $(1/Q_k)^2 + y_{ok}^2 = \frac{1}{Q^2}$, $\frac{B}{f_o} = \frac{1}{Q}$, et $K = \prod_1^n Q_k/Q$. En utilisant les relations approchées on a : $K \# 2^{n-1}$ c'est-à-dire que chaque fois que l'on introduit un circuit K croit de 6 dbs.

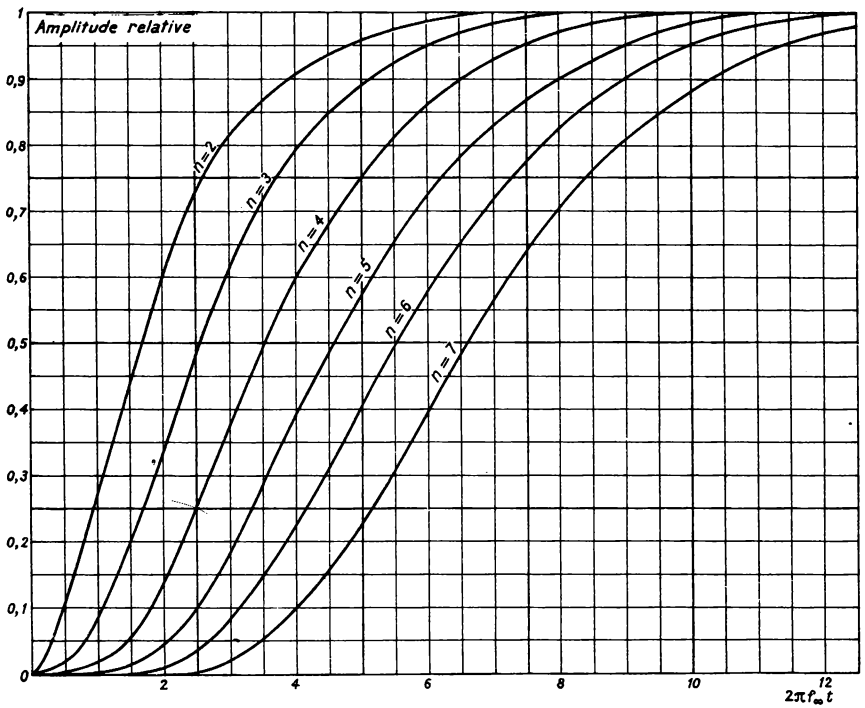


Fig. 40. - Amplificateur RC à plusieurs étages (réponse transitoire).

Le gain à la fréquence centrale est donc $g_o = \prod_1^n \frac{p_k R_k}{Q_k} Q$ comme $Q_k = R_k C_k \omega_{ok}$ (C_k = capacité d'accord) si $m = p_k/2\pi C_k$ est le même pour chaque étage, $g_o = (mQ)^n \prod_1^n \frac{1}{f_{ok}}$. Les circuits étant symétriques deux à deux par rapport à f_o on a $\prod_1^n f_{ok} = f_o^n$ et $g_o = \left(\frac{mQ}{f_o}\right)^n$. Le gain moyen par étage est alors $g_{moy} = g_o^{\frac{1}{n}} = m/B$

Si les différents C.O. sont accordés avec les seules capacités parasites des tubes, $C_k = C_{pc} + C_{gc}$ et m est à $1/2\pi$ près le facteur de mérite des tubes employés : le facteur de mérite des étages divisé par 2π est égal au gain moyen par étage multiplié par la bande passante.

Le gain g_o étant fixé et la bande donnée par ailleurs, une fois les tubes choisis, le nombre d'étages se déduit immédiatement. Soit par exemple à obtenir un gain en tension de 60 dbs ($g_o = 10^3$) pour une fréquence centrale $f_o = 25$ Mc/s et une bande passante B = 10 Mc/s, supposons prendre des E F 42 (p = 9,5 m A/V), $C_{gc} + C_{pc} = 14$ pf, comptons 10 pf pour le câblage, support, etc... On a $C_k = 24$ pf, soit $m = 6,3.10^7$ c/s. $g_{moy} = m/B = 6,3$ $g^n_{moy} = g_o = 10^3$ donne n = 4 (n = 3,74). Donc 4 circuits sont nécessaires.

Comme $B/f_0 = 0,4$, on utilisera les relations approchées indiquées, desquelles on tire $Q_1 = Q_3 = 6,55$ et $Q_2 = Q_4 = 2,7$ de même on aura :

$f_{\substack{01\\03}} - f_0 = \pm 4,62$ Mc/s et $f_{\substack{02\\04}} - f_0 = \pm 1,92$ Mc/s

$f_{01} = 20,4$ Mc/s ($\omega = 1,28.10^8$), $f_{03} = 29,6$ Mc/s ($\omega = 1,86.10^8$)

$f_{02} = 23,1$ Mc/s ($\omega = 1.45.10^8$), $f_{04} = 26,9$ Mc/s ($\omega = 1,69.10^8$)

d'où les inductances d'accord : ($C_k = 24$ pf)

$L_1 = 2,54\ \mu h$ $L_2 = 1,98\ \mu h$ $L_3 = 1,21\ \mu h$ $L_4 = 1,46\ \mu h$

et les résistances parallèles ($Q = RC\omega$) :

$R_1 = 2.120\ \Omega$ $R_2 = 776\ \Omega$ $R_3 = 1.470\ \Omega$ $R_4 = 667\ \Omega$

Nous n'avons pas examiné l'impédance d'entrée du tube, après un premier calcul il conviendrait de le faire et au besoin de reprendre les calculs en en tenant compte si on ne peut la négliger.

Chaque circuit doit être réglé individuellement, le tube suivant étant lui-même chargé normalement.

Les réglages sont rendus plus aisés si, au lieu d'utiliser un seul groupe de n circuits, on réalise plusieurs groupes (G groupes), chacun comportant bien entendu un nombre moindre de circuits que précédemment, mais chaque groupe restant par ailleurs constitué de la même façon (position des fréquences par rapport à f_0, surtensions égales des circuits symétriques...)

Dans ce cas (G groupes de n circuits chacun)

$g = \frac{g_o}{[(1 + y/y_\ell)^{2n}]^{G/2}}$ au lieu de $g = \frac{g_o}{[(1 + (y/y_\ell)^{2nG}]^{1/2}}$ pour un seul groupe ayant le même nombre total G_n de circuits.

La bande à 3 dbs est telle que $y = \frac{B}{f_\alpha}(2^{1/G} - 1)^{1/2n}$ au lieu de $y = B/f$ pour un seul groupe, elle est donc plus faible.

Enfin, dans le cas où l'on désire pour une fréquence f située en dehors de la bande et telle que $y/y_\ell = x$ obtenir un affaiblissement donné de N.dbs, le nombre n de circuits à utiliser dans le cas d'un seul groupe est $n \neq \frac{N.dbs}{20 \log x}$

Examen oscillographique d'un amplificateur à large bande

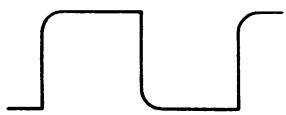
En appliquant à l'entrée de l'amplificateur un signal carré et en examinant le signal de sortie à l'aide d'un oscillographe, on peut se faire une idée des défauts de l'amplificateur. Il faudra

1 **Défaut aux fréquences basses.**

Effet d'un délai de transmission Θ trop faible, et atténuation.

2 Même chose plus prononcée.

3 Effet d'un Θ trop fort.



4 **Défauts aux fréquences élevées.**

Effet d'un Θ trop fort et atténuation.

5 Même chose plus prononcée.

6 Θ constant (courbe symétrique), atténuation, amortissement excessif des circuits

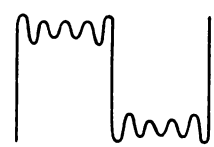
7 **Existence de fréquences propres.**

Effet d'une résonance série (résonance) et accroissement du gain pour cette fréquence.

8 Même chose mais la fréquence correspond à celle du signal.

9 Effet d'une résonance parallèle (antirésonance) et diminution du gain sur cette fréquence.

10 Même chose mais la fréquence correspond à celle du signal.



11 Effet d'une fréquence de coupure, Θ constant (courbe symétrique).

Fig. 41. - Examen oscillographique d'un amplificateur à large bande.

toutefois se méfier de l'oscillographe et ne pas attribuer à l'amplificateur étudié les défauts propres à celui de l'appareil de contrôle. On peut pour plus de sûreté - si le niveau de sortie est suffisant - attaquer directement les plaques déflectrices du tube cathodique. Les principaux oscillogrammes et les défauts qu'ils caractérisent sont indiqués fig.41.

REACTION - CONTRE-RÉACTION

Contre-réaction - réaction inverse ou réaction négative

Si l'on considère un amplificateur de gain A à la sortie duquel on prélève le signal S pour le réinjecter à l'entrée, à l'aide d'un système passif (c'est-à-dire ne comportant que des éléments R L C à l'exclusion de tout tube), dont le coefficient de transmission est k, et tel que la fraction k S réinjectée vienne en opposition de phase avec le signal d'entrée E, on dit qu'il y a contre-réaction (fig.42-a).

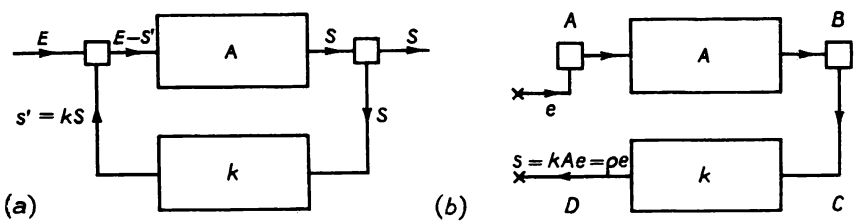


Fig. 42. - Contre-réaction.

L'application d'une contre-réaction à un amplificateur apporte des avantages à certains points de vue et fait perdre évidemment sur d'autres points.

La contre-réaction ne doit pas être confondue avec la réaction (réaction positive ou directe) qui consiste au contraire à réinjecter la fraction kS du signal en phase avec le signal d'entrée E. Ce second procédé est générateur d'oscillations.

A étant le gain de l'amplificateur initialement sans contre-réaction, on a après contre-réaction A (E − k S) = S c'est-à-dire un gain résultant g tel que:

$$g = \frac{S}{E} = \frac{A}{1 + kA} \qquad (1)$$

Les servo-mécanismes reposent sur ce principe. Si A est très grand et k = 1 (contre-réaction totale), on a à l'entrée E - S = ε, ε est l'erreur, et l'on a un servomécanisme à amplification de l'erreur.

Dans l'expression générale (1), g est le gain complexe du système, A et k pouvant être eux-mêmes complexes. La grandeur ρ = k A est le rapport de transmission de la chaîne supposée ouverte, puisqu'en effet si la chaine est ouverte (fig.42-b) et si l'on injecte à l'entrée e, on a pour signal de sortie s = ρ e. ρ est

d'une grande importance pratique (fig.43).

Si pour une certaine fréquence, ρ devient égal à - 1, il en résulte un gain g infini. En fait g ne devient pas infini, car des phénomènes de saturation - sur les tubes par exemple - interviennent et limitent g (les systèmes physiques réels n'étant jamais linéaires et présentant toujours des phénomènes de saturation). g devient cependant très grand et le système entre en oscillation. Ceci signifie simplement que le long de la boucle A B C D, une rotation de phase de π s'est produite et que la contre-réaction est devenue réaction, réinjectant ainsi le signal en phase et non plus en opposition.

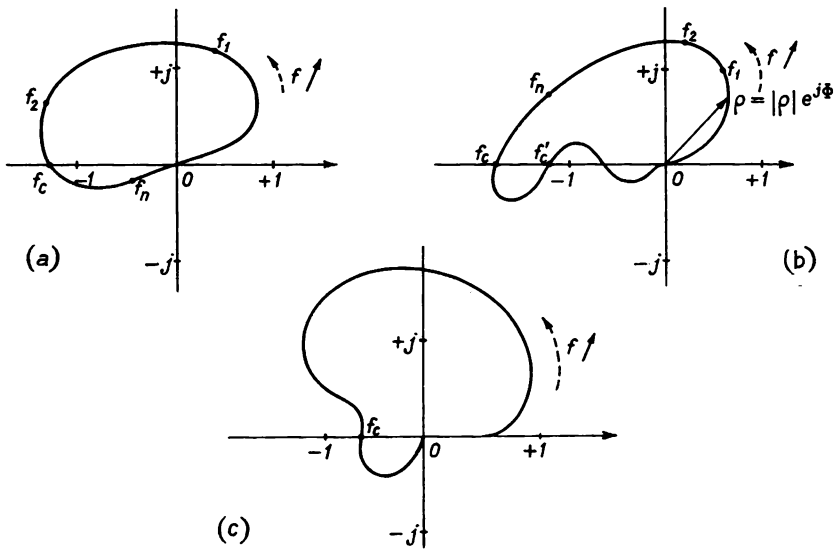


Fig. 43. - Diagrammes de Nyquist.

Pour qu'un système soit stable, il faut qu'au moment où la phase a tourné de π , ρ soit en module inférieur à 1, sinon le système entrera en oscillation sur la fréquence $f = f_c$ pour laquelle $\rho \sim e^{j\pi}$ (fig.43-a). En fait, ceci n'est pas rigoureux et pour qu'un système soit stable, il est simplement nécessaire que ρ (f) n'entoure pas le point - 1,0 du plan complexe. Le système correspondant à la fig.43-b est stable, bien que pour $f = f_c$ ou f'_c , $|\rho|$ soit supérieur à 1. Physiquement, ceci peut se comprendre en remarquant que d'après ce qui a été dit précédemment le système devrait osciller sur f_c et f'_c . Aucune de ces deux fréquences n'étant privilégiée, le système n'oscillera pas. Cependant, ce système n'est pas absolument stable, car une diminution fortuite du gain A par exemple amènera le point - 1,0 à l'intérieur de $\rho(f)$ et le système entrera en oscillation. Les propriétés de la courbe ρ (f) traduisent le criterium de Nyquist.

Pour $f \longrightarrow \infty$, $\rho \longrightarrow$ toujours vers 0, mais pour $f \longrightarrow 0$, $\rho \longrightarrow$ vers une valeur finie non nulle ou zéro suivant que le système transmet ou ne transmet pas la composante continue. Le système de la fig.43-c transmet la composante continue et est absolument stable.

L'intérêt pratique de ρ apparaît donc, puisque l'on peut toujours tracer la courbe ρ (f) en ouvrant la chaine, en injectant e à l'entrée et en mesurant $\left|\frac{e}{s}\right|$ et la phase de s par rapport à e. Avant de fermer la chaine d'un système à contre-réaction quelconque, il est nécessaire de tracer ρ (f) jusqu'à la valeur de f pour laquelle $|\rho| < 1$ et de s'assurer ainsi que le système sera stable. C'est donc, en fait, bien au-delà de la bande classique qu'il faut étudier un système de ce genre. Si le système apparaît comme devant être instable, on modifiera ρ (f) par l'introduction de systèmes correcteurs.

On peut du point de vue amplification caractériser la contre-réaction par les trois points suivants qui précisent ce qu'elle apporte :

1) Réduction du bruit de fond et des distorsions linéaires ou non dans le rapport $\frac{1}{1 + k A}$ (fonction de la fréquence).

2) Réduction du gain dans le rapport $\frac{1}{1 + k A}$

3) Régulation de la courbe de réponse en amplitude et phase.

Si donc, on veut améliorer un amplificateur du point de vue bruit, distorsions et courbe de réponse, la contre-réaction peut apporter une solution, mais il est nécessaire que cet amplificateur ait initialement un gain et une bande passante suffisants.

Contre-réaction de tension et impédance de sortie.

La contre-réaction modifie également l'impédance de sortie d'un amplificateur. Si R_i est la résistance interne de l'étage de sortie, c'est-à-dire l'impédance interne de la source que constitue l'amplificateur vu des bornes de sortie, et si R_p est sa charge de plaque, μ le coefficient d'amplification du tube, on a : $A = \frac{\mu}{1 + R_i / R_p} < \mu$, après application de la contre réaction, on aura $g = \frac{A}{1+kA}$ soit $g = \frac{\mu}{1 + k\mu + \frac{R_i}{R_p}}$ ou $g = \frac{\frac{\mu}{1+k\mu}}{1 + \frac{R_i}{(1+k\mu)R_p}} = \frac{\mu'}{1 + \frac{R'_i}{R_p}}$

le système se comporte comme un générateur de f.e.m $\mu' E = \frac{\mu}{1 + k\mu} E$ au lieu de μE et de résistance interne $R'_i = R_i / (1 + k\mu)$ au lieu de R_i.

La contre-réaction de tension réduit l'impédance interne R_i de l'amplificateur dans le rapport $\frac{1}{1 + k\mu}$, alors que le gain A primitif n'est réduit que dans le rapport $\frac{1}{1 + kA}$

L'impédance de sortie R_s est telle que : $\frac{1}{R_s} = \frac{1}{R'_i} + \frac{1}{R_p}$

Contre-réaction de courant et impédance de sortie.

Au lieu de réinjecter une fraction de la tension de sortie, on peut réinjecter une fraction du courant de sortie S/R_p, soit par exemple $s = r.\ S/R_p$, la tension effective d'entrée devenant alors $E - s$, ceci revient à remplacer dans les relations précédentes k par r/R_p fonction de la charge R_p et $g = \dfrac{A}{1 + \frac{r}{R_p} A}$

de sorte que $g = \dfrac{\frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_p}}}{1 + \frac{\mu r}{\left(1 + \frac{R_i}{R_p}\right) R_p}}$ soit $g = \dfrac{\mu}{1 + \frac{R_i + \mu r}{R_p}}$

Tout se passe comme si la résistance interne était devenue $R_i + \mu r$: la contre-réaction d'intensité augmente la résistance interne de sortie.

Dans le cas d'une réaction les résultats relatifs à la tension et au courant sont inversés k et r devenant alors négatifs dans les relations précédentes.

Effet de la contre-réaction sur l'impédance d'entrée.

Si, au lieu de supposer comme on l'a fait implicitement précédemment, que l'impédance d'entrée est infinie, celle-ci est Z_e avant contre-réaction, le courant d'entrée étant $I_e = E/Z_e$, après contre-réaction de tension et de courant, celui-ci deviendra $i_e = (E - ks - \frac{r}{R_p} S)/Z_e = \frac{E}{Z_e}\left[1 - \left(k + \frac{r}{R_p}\right) g\right]$ c'est-à-dire que l'impédance d'entrée est devenue $Z'_e = \dfrac{Z_e}{1 - \left(k + \frac{r}{R_p}\right) g}$ elle a donc augmenté, ce qui est un avantage. Par contre une réaction diminuerait Z_e

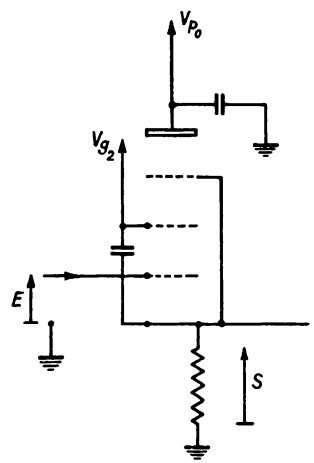


Fig. 44.

- Contre-réaction totale.

ÉTAGE A CONTRE-RÉACTION TOTALE
cathode follower ou cathodyne

Dans le montage de la fig.44, la plaque est à la masse du point de vue H.F. et la charge est dans la cathode, c'est-à-dire que toute la tension de sortie se trouve réinjectée entre grille et cathode : il y a contre-réaction totale (k = 1). On peut noter que tension de sortie et d'entrée (tensions prises par rapport à la masse) sont en phase.

On a ici, d'après le théorème du circuit plaque :

$R_i\ i_p = -\ R_k i_p + \mu\ (E - R_k\ i_p)$ soit comme $S = R_k\ i_p$, $g = \frac{S}{E} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\mu}(1 + R_i/R_k)} < 1$, l'étage n'amplifie pas, la tension de sortie est même inférieure à la tension d'entrée. Ce montage peut donc ne pas sembler intéressant; en fait il l'est à un autre point de vue. En effet, la résistance interne est ici $R'_i = R_i\ (1 + \mu)$, soit $R_i \neq 1/p$ donc très faible.

Par ailleurs, au point de vue entrée, la plaque étant à la masse, on trouve sur l'entrée C_{gp}, d'autre part l'effet Miller est ici négligeable puisque entrée et sortie sont à des potentiels très voisins en amplitude et de plus en phase ($S \neq E$). Si donc la grille ne débite pas l'impédance d'entrée sera très élevée. Il résulte de tout ceci que ce montage, s' il désamplifie légèrement, présente le grand avantage d'une impédance d'entrée élevée et d'une impédance de sortie faible. Il sera par conséquent tout indiqué pour l'adaptation entre un étage à haute impédance et un étage à faible impédance. Il est en outre couramment utilisé comme "séparateur" entre un oscillateur et la suite d'une chaine : il évite que l'oscillateur soit perturbé par ce qui se passe au-delà. Il est indispensable que la plaque soit aussi parfaitement que possible à la masse du point de vue H.F. Dans le cas où l'on utilise une pentode, g_3 sera réuni à la cathode et g_2 ramené pour la H.F. au potentiel de la cathode.

Amplification sélective T.B.F.

Aux très basses fréquences, on ne peut réaliser d'amplificateur sélectif classique avec CO accordé dans la plaque, la réalisation du circuit devenant pratiquement impossible. On peut alors utiliser un amplificateur avec une contre-réaction sélective telle qu'il y ait contre réaction sur toutes les fréquences, sauf sur une et en son voisinage immédiat. Pour cette fréquence privilégiée, on bénéficiera ainsi du gain total A de l'amplificateur avant C.R., alors que pour toutes les autres fréquences, il y aura C.R. donc diminution du gain. L'effet sélectif cherché est alors obtenu. Le montage le plus classique utilise les propriétés du filtre double T à résistance capacité qui possède précisément pour une fréquence f_0 bien déterminée un coefficient de transmission k nul. Le schéma de principe est alors celui d'un montage à C.R. dans lequel le circuit passif est le T.T.

On a ainsi $g = \frac{A}{1 + kA}$ où $k = j\frac{\Delta\omega}{2\omega_o}$ au voisinage de f_o. d'où

$$|g| = \frac{A}{\sqrt{1 + \frac{A^2}{4}\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_o}\right)^2}} \quad \text{soit} \quad |g| = \frac{A}{\sqrt{1 + 4\left(\frac{A}{4}y\right)^2}} \quad \text{où} \quad y = \frac{\Delta\omega}{\omega_o}$$

Comparant à la sélectivité d'un C.O. classique, on voit que $1 + 4\ Q^2\ y^2$ est remplacé par $1 + 4\left(\frac{A}{4}\right)^2\ y^2$ le montage équivaut

donc à un C.O. de surtension Q = A/4, le gain étant en outre sur f_o égal à A, (y = O). Pour un amplificateur de gain initial A (sans C.R.) de 10^3, la surtension équivalente est 250, ce qui correspond à un très bon circuit.

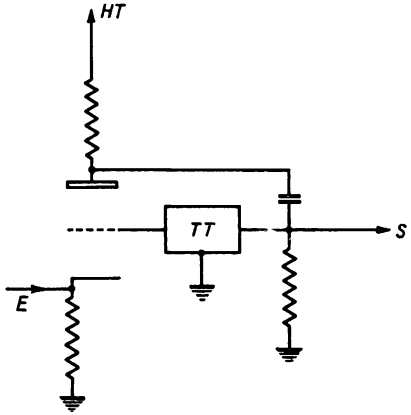


Fig. 45. - Contre-réaction sélective.

La bande passante B = f_o/Q = 4 f_o/A peut être très faible. Soit par exemple pour f = 10 c/s et A = 100 : B = 0,4 c/s.

On peut donc obtenir ainsi de grandes sélectivités, l'amplificateur étant par ailleurs stable si les conditions générales énoncées plus haut sont satisfaites.

Le montage le plus simple de ce type est indiqué fig.45.

LES GÉNÉRATEURS D'ONDES SINUSOIDALES

Il existe une très grande variété d'oscillateurs. Quel qu'en soit le type, un montage oscillateur consiste toujours à ramener une certaine fraction de la tension de sortie sur l'entrée avec une phase convenable d'une part (réinjection en phase avec l'entrée; réaction) et telle que l'atténuation introduite par le réseau passif - effectuant le couplage entre entrée et sortie - puisse être compensée par le gain du ou des tubes.

Il en résulte que les conditions d'oscillation d'un système sont au nombre de deux - une de phase et une d'amplitude - que l'on devra satisfaire simultanément.

La recherche de ces conditions est indispensable, même lorsque pour obtenir des expressions maniables, on est conduit à faire certaines approximations. Elles permettent, en effet, (indépendamment du projet initial) lors de la mise au point, de savoir quelles sont les grandeurs fondamentales qui interviennent, celles sur lesquelles on peut jouer facilement et dans quel sens il faut éventuellement les modifier. Elles permettent également de se faire une idée des ordres de grandeur à attribuer aux différents paramètres en jeu.

Conditions générales d'oscillation.

Un oscillateur pouvant toujours se ramener à la forme générale de la fig.46, on peut utiliser la méthode suivante pour la recherche des conditions d'oscillation :

Le système étant supposé avoir atteint son régime permanent et p étant la pente dynamique du montage, on a :

$$i_p = p\, v_g \qquad \text{et } v_p = -Z i_p = -Zp v_g$$

D'autre part, la chaîne de réinjection ramène sur l'entrée $v_g = kv_p$ d'où la condition générale en limite d'oscillation :

$$k\,p\,Z = -1$$

k, p et Z étant dans le cas général tous trois complexes, la relation précédente donnera lieu aux deux conditions d'oscillation prévues.

$k\,p\,Z = -1$ est à rapprocher de l'expression du gain d'un système à contre-réaction dans laquelle on ferait k négatif (réaction) et $-p\,Z = A$, la stabilité est alors compromise pour $kA = +1$ soit $k\,p\,Z = -1$.

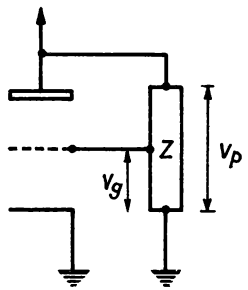


Fig. 46. - Oscillateur.

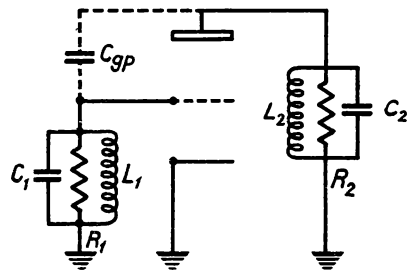


Fig. 47. - Montage T.P.T.G.

Oscillateur T.P.T.G.

C'est le montage dit à circuits accordés (T.P.T.G.) représenté fig.47 pour les variations seules. Dans cet oscillateur le couplage entre entrée et sortie est effectué par C_{gp} (effet Miller). La résistance parallèle R_2 du circuit plaque comprend l'amortissement dû au tube. Si Z_1 et Z_2 sont les impédances des C. O. grille et plaque, z l'impédance de C_{gp} on a $v_g = v_p \frac{Z_1}{Z_1 + z} = k\,v_p$, z et Z_1 faisant diviseur, d'où $\frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + z} = -\frac{1}{p}$. En écrivant :

$$z = -\frac{j}{C_{gp}\omega} \qquad Z_1 = \frac{R_1}{1 + j\,Q_1\left(\frac{\omega^2}{\omega_1^2} - 1\right)}, \quad Z_2 = \frac{R_2}{1 + j\,Q_2\left(\frac{\omega^2}{\omega^2} - 1\right)}$$

où $\omega_1^2 = \frac{1}{L_1 C_1}$ $\omega_2^2 = \frac{1}{L_2 C_2}$ et $Q_1 = \frac{R_1}{L_1 \omega}$ $Q_2 = \frac{R_2}{L_2 \omega}$

(ici Q_1 et Q_2 ne sont pas les surtensions à la résonance, mais des grandeurs du même genre définies à la fréquence d'oscillation ω). On aboutit alors à l'expression suivante où $\delta = R_1\,C_{gp}\,\omega$.

$$-\frac{1}{p} = \frac{R_2 \delta}{\left\{\delta + Q_1\left(\frac{\omega^2}{\omega_1^2} - 1\right) + Q_2\left(\frac{\omega^2}{\omega_2^2} - 1\right)\right\} + j\left\{Q_2\left(\frac{\omega^2}{\omega_2^2} - 1\right)\left[\delta + Q_1\left(\frac{\omega^2}{\omega_1^2} - 1\right)\right] - 1\right\}} \quad (1)$$

En supposant p réel (ce qui n'est pas en toute rigueur), il faut donc

$$Q_2\left(\frac{\omega^2}{\omega_2^2} - 1\right)\left[\delta + Q_1\left(\frac{\omega^2}{\omega_1^2} - 1\right)\right] = 1 \qquad \text{(condition de phase)} \quad (2)$$

qui détermine ω en fonction des éléments du circuit. D'après (2), (1) devient :

$$-\frac{1}{p}=\frac{R_2\,\delta}{Q_2\left(\frac{\omega^2}{\omega_2^2}-1\right)+\frac{1}{Q_2\left(\frac{\omega^2}{\omega_2^2}-1\right)}} \quad \text{(conditions d'amplitude) (3)}$$

qui fixe la pente que doit avoir le montage pour pouvoir entrer en oscillation. Les relations (2) et (3) se prêtent à la discussion. Supposons par exemple osciller sur la fréquence du circuit grille ($\omega = \omega_1$), alors $\delta = 1/Q_2\,(\frac{\omega^2}{\omega_2^2} - 1)$ comme δ est positif, il faut alors que le C.O. plaque se comporte comme une capacité ($\omega > \omega_2$), mais alors (3) s'écrit $-\frac{1}{p} = R\delta/(\frac{1}{\delta}+\delta)$ le deuxième membre est > 0 et le premier < 0.

On ne peut donc osciller sur ω_1 . On ne peut non plus osciller sur ω_2 car alors (2) ne peut être satisfait. Dans ce montage - dit à circuits grille et plaque accordés - on n'oscille donc en fait ni sur ω_1 , ni sur ω_2 .

Il résulte de la condition d'amplitude qu'il faut $\omega < \omega_2$, ce qui impose pour la condition de phase que $Q_1\left(\frac{\omega^2}{\omega_1^2} - 1\right)$ soit < 0 et d'autant plus que $\delta = R_1\, C_{gp}\, \omega$ est grand. En supposant que Q soit le même pour les deux circuits, on est ainsi conduit à la relation suivante : entre ω , ω_1 et ω_2 : $1 > \frac{\omega}{\omega_2} > \frac{\omega}{\omega_1}$ ou $\omega < \omega_2 < \omega_1$. Les deux C.O. sont ainsi désaccordés par rapport à la fréquence d'oscillation et se comportent comme des selfs. On peut se faire une idée de la pente p minimum compatible avec la condition d'oscillation en rendant minimum le dénominateur de (3), c'est-à-dire en faisant : $Q_2\left(\frac{\omega^2}{\omega_2^2} - 1\right) = -1$, alors $p_{min} = 2/R_1\, R_2\, C_{gp}\, \omega$ soit en supposant $L_1 = L_2$, $R_1 = R_2 = R$ (puisque $Q_1 = Q_2$), $p_{min} = 1/\pi\, R^2\, C_{gp}\, f$.

Soit par exemple pour $R = 10\ K\Omega$, $C_{gp} = 5$ pf et $f = 1$ Mc/s, $p_{min} = 0{,}65$ mA/V. Si $Q = 10$, on aura $f_2 = f/\sqrt{1-\frac{1}{Q}} = 1{,}055$ Mc/s, soit $L = R/Q\,\omega = 0{,}16$ mh et $C_2 = 1/L\omega_2^2 = 140$ pf.

Si on ne peut réaliser la pente minimum, il faudra alors augmenter C_{gp} artificiellement de façon à diminuer p_{min} ce qui correspond à une augmentation du couplage, ou bien si l'on conserve à R et C_{gp} leur valeur, il faut diminuer la polarisation du tube, de façon à accroître p.

On peut remarquer au passage que ce montage n'est pas adapté aux basses fréquences. On y serait conduit à des pentes trop fortes ou à accroître exagérément C_{gp} , ce qui amènerait alors des perturbations dans le fonctionnement du tube.

Bien que partant de conditions générales assez peu maniables, il apparaît que l'on peut en ne faisant que peu d'hypothèses restrictives (et malgré tout valables) discuter très facilement un montage.

Les expressions simples auxquelles on aboutit ainsi sont précieuses pour la mise au point.

Nous donnons ci-après les divers types d'oscillateurs les plus couramment utilisés sans entrer, comme pour le T.P.T.G., dans les détails.

OSCILLATEURS B.F.

Pour les basses fréquences (jusqu'à quelques dizaines de Kc/s), on peut utiliser l'un des deux types d'oscillateurs (Pl.2-a et b). La fréquence d'oscillation est donnée par :

$f = 1/2\pi\, RC\sqrt{6}$ pour (a) et $f = \sqrt{6}/\pi\; R\,C$ pour (b)

Le gain g du tube intervient peu sur f lorsque l'on est en limite. La valeur de g nécessaire à l'entretien est $g = 29$.

En utilisant pour les capacités C, des condensateurs variables usuels, on peut faire varier facilement f dans un rapport de 1 à 10 pour une gamme. En commutant les résistances, on obtient ainsi différentes gammes. Le même résultat peut être obtenu en prenant pour C des condensateurs fixes que l'on commutera, et en faisant les R variables à l'aide de potentiomètres. L'onde de sortie délivrée par ces oscillateurs est stable en amplitude et fréquence et bien sinusoïdale.

Un autre type est constitué par un amplificateur à contre-réaction sélective auquel on adjoint une réaction apériodique. Le circuit de contre-réaction est obtenu à l'aide du double T ou d'un pont du type à résonance (pl.2-c) ou encore d'un pont de Wien (Pl.2-d). Le cas des ponts nécessite l'emploi de transformateurs à écran. Le double T est généralement préféré. La réaction permet l'oscillation et la contre-réaction apporte la sélectivité, permettant ainsi l'obtention d'une onde très pure.

OSCILLATEURS H.F.

Pour les fréquences élevées, il faut utiliser d'autres montages. Les plus classiques sont le Colpitts d'une part (pl.3-a) et le Hartley d'autre part (pl.3-b et c).

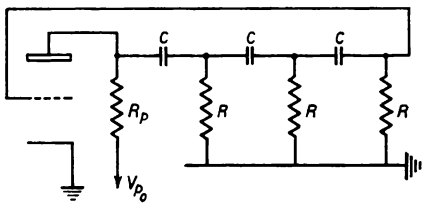
1) Montage Colpitts : (**pl. 3 - a**)

On a sensiblement $\Gamma/C \neq v_p/v_g$, d'autre part C_{gp} vient en parallèle sur L et peut en modifier la valeur, de même C_{pc} modifie C et C_{gc}, Γ. L'amortissement consécutif au débit grille est représenté par R_g, R_s est la charge éventuelle apportée par l'étage suivant, enfin R_L représente les pertes de L. Les bl sont des éléments de blocage H.F. et r une résistance d'auto-polarisation de grille.

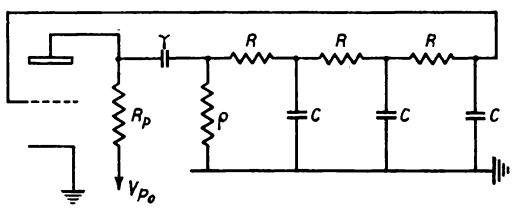
Le C.O. est légèrement désaccordé et fonctionne en capacité, c'est-à-dire sur $f > f_o$. La pente nécessaire à l'oscillation est telle que :

$$p \neq \frac{1}{R_L} + \frac{\Gamma}{C}\cdot\frac{1}{R_s} + \frac{C}{\Gamma}\,\frac{1}{R_g}$$

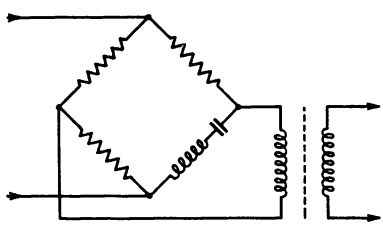
(a)



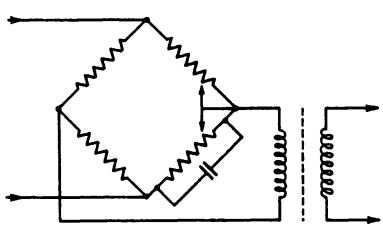
(b)

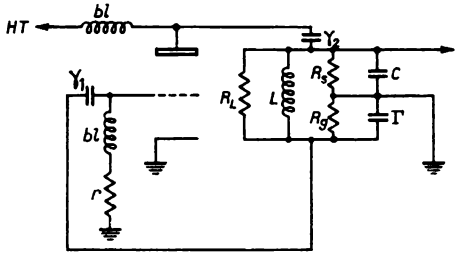


(c)

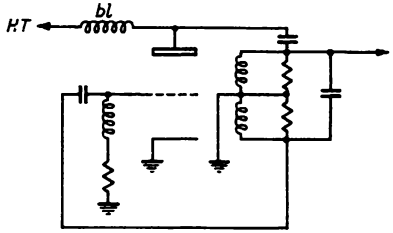


(d)

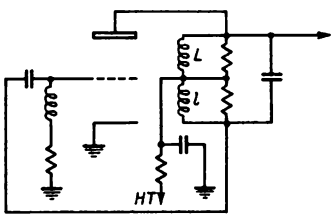



HT
bl
Y_2
Y_1
R_L
L
R_g
C
Γ
bl
r

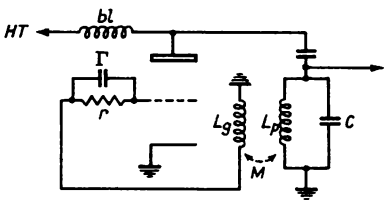
(a)


HT
bl

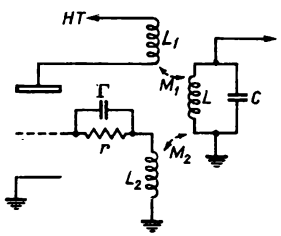
(b)


L
l
HT

(c)


HT
bl
Γ
r
L_g
L_p
C
M

(d)


HT
L_1
M_1
L
C
Γ
r
M_2
L_2

(e)

2) Oscillateur Hartley : (pl. 3 b et c)

Il est l'inverse du Colpitts. Dans la Pl.3-c, on indique une variante pour l'alimentation du tube. Dans cette dernière, L est parcouru par $\overline{i_p}$, mais elle évite l'emploi des éléments de blocage.

On a $v_p / v_g = L/l$. Les capacités interélectrodes interviennent également. Ici encore le C.C. fonctionne en désaccordé, mais sur $f < f_o$.

3) Oscillateur à couplage inductif :

C'est le montage de la pl.3-d. Il est très classique. On a indiqué dans la grille le système r, Γ , d'auto-polarisation très souvent utilisé.

4) Oscillateur Meissner - (pl.3-e) :

Il est à double couplage inductif et s'apparente au Hartley.

Tous ces oscillateurs sont peu stables.

Montages oscillateurs stables.

Les montages suivants, également pour oscillateurs H.F. présentent une meilleure stabilité.

1) Oscillateur Franklin :

Il est représenté Pl.4-a et utilise deux tubes, le second produisant la rotation de phase nécessaire. Les conditions d'oscillations sont très simples et évidentes.

2) Oscillateur E.C.C. - (Pl.4-b) :

Il a l'avantage d'être assez indépendant des variations de la H.T. Une variation de la H.T. produisant des effets inverses au point de vue dérive sur la plaque et l'écran, à condition de bien choisir le point de fonctionnement du tube. Il est constitué par un Colpitts g_2 jouant le rôle de plaque. g_2 est à la masse du point de vue H.F., tandis que la cathode est portée à un potentiel H.F. Il y a couplage électronique entre g_2 et sortie.

3) Oscillateur Dynatron - (Pl.4-c) :

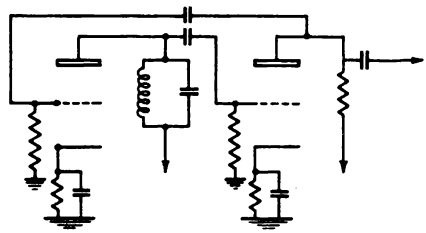
Il utilise les propriétés de résistance négative d'une tétrode fig.38. La résistance du tube $R_i < O$ doit être telle que pour le point de fonctionnement, on ait une compensation de la résistance parallèle R_p du C.C. par R_i. L'écran doit évidemment être à un potentiel plus élevé que la plaque.

Montages oscillateurs très stables utilisant des quartz.

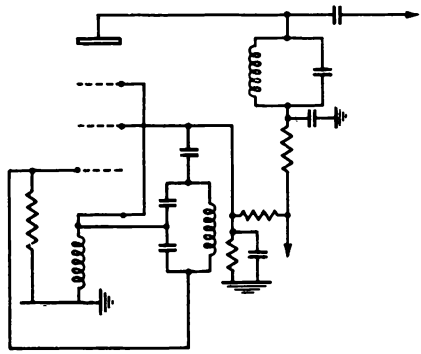
Le schéma électrique équivalent à un cristal de quartz est celui de la fig.48 : L, C, r sont caractéristiques de l'effet piezo-électrique et Γ représente la capacité inévitable entre les deux faces du cristal, C_o par contre peut ne pas exister lorsque les faces sont métallisées et que la liaison électrique est effectuée directement dessus.

PLANCHE 4 . - OSCILLATEURS STABLES.

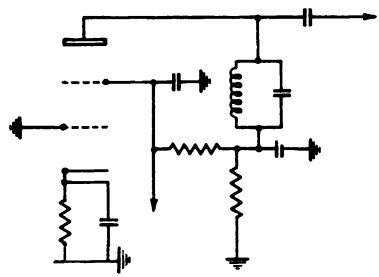
(a)



(b)



(c)



Le dipole équivalent montre que le cristal possède deux fréquences propres, une de résonance (série) ω_0 et une d'antirésonance (parallèle) ω_1. ω_0 et ω_1 sont données par : $LC\,\omega_0^2 = 1$ et $LC\,\omega_1^2 = 1 + \frac{C}{\Gamma}$.[1] La fig.48 donne l'allure des variations de la réactance du cristal en fonction de la fréquence f. Les deux fréquences f_0 et f_1 (sont très voisines et pratiquement confondues puisque C/Γ en l'absence de toute capacité parallèle surajoutée ou parasite, est une constante du cristal égale sensiblement à 1/145. ω_1 peut être modifiée par un accroissement artificiel de Γ, ce qui permet éventuellement d'ajuster la fréquence. Comme $\frac{\omega_1\ \omega_0}{\omega_0} \neq \frac{1}{2}\frac{C}{\Gamma}$ on ne peut que diminuer ω_1. La modification de Γ ne change pas ω_0 qui par contre est affectée par C_0, ω_0 devient pour C_0 non infini tel que $L\ C\ \omega_0^2 = 1 + \frac{C}{C_0 + \Gamma}$, on peut donc augmenter ω_0. Les modifications relatives que l'on peut faire subir à ω_0 et ω_1 ne peuvent être d'ailleurs que très faibles, de l'ordre de quelques 10^{-5}, sous peine d'être conduit à des accrochages difficiles et de rendre le montage instable.

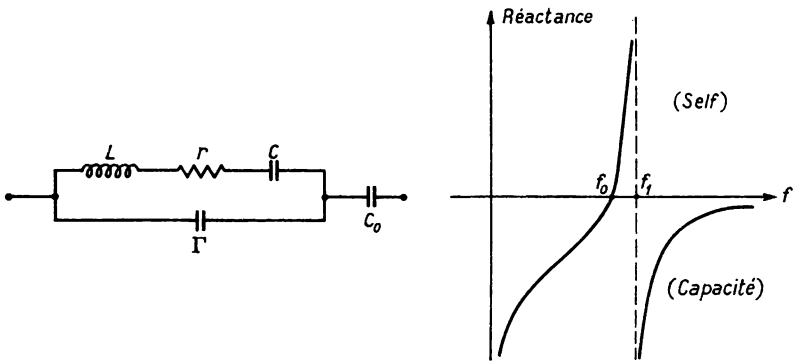


Fig. 48. - Quartz - Schéma équivalent.

Le cristal se présente ainsi comme un C.O. série ou parallèle, dont le principal intérêt est d'avoir une surtension Q très grande pouvant dépasser 10^4 et allant parfois jusqu'à 10^5. Il est bien évident que pour conserver au cristal cette qualité, il faut prendre dans les montages de grandes précautions, afin de ne pas introduire d'amortissements supplémentaires. Les précautions doivent être aussi bien mécaniques (suspension du cristal) qu'électriques (réaction des différents circuits sur le quartz). On va parfois jusqu'à mettre le cristal sous vide, afin d'éliminer l'amortissement supplémentaire qu'apporte la présence de l'air, et l'isoler ainsi thermiquement.

Sur ω_0 le cristal se présente donc comme une résistance très faible r tandis que sur ω_1, il se présente comme une résistance très élevée $R = Q^2\left(\frac{C}{\Gamma}\right)r$ où $Q = \frac{L\,\omega_0}{r}$

(1) En négligeant l'effet de r toujours très faible.

Les montages les plus courants sont les suivants :

1) Quartz entre grille et cathode avec C.O. plaque (Pl.5-a) :

Le cristal vibre entre ω_0 et ω_1 au voisinage de ω_1 . Il se comporte donc comme une self. Le couplage est effectué par C_{gp} (effet Miller). Ce montage est à rapprocher du T.P.T.G. Il est nécessaire d'introduire R_g pour définir le potentiel de grille. De plus, f_{co} doit être supérieur à f_1 . La fréquence ω d'oscillation est donnée par :

$$LC\omega^2 = 1 + \frac{C}{\Gamma + C_{gc} + C_{gp}}$$

et la pente nécessaire à l'oscillation est :

$$p \geqslant r\left[1 + \frac{C_{gp}}{\Gamma + C_{gc}}\right]^2 \cdot (L_1 C_1 \omega^2 - 1)\frac{C_{gp}}{L_1}$$

2) Quartz entre grille et plaque avec C.O. plaque (Pl.5-b) :

L'oscillation a lieu entre ω_0 et ω_1 , C_{gp} est en parallèle sur le cristal. Ici, il faut $f_{C_o} < f_o$. La fréquence d'oscillation est donnée aux approximations près par la même relation que dans le cas précédent. Tandis que la pente nécessaire est ici :

$$p \geqslant r\left[1 + \frac{C_{gc}}{\Gamma + C_{gp}}\right]^2 \cdot (1 - L_1 C_1 \omega^2)\frac{C_{gc}}{L_1}$$

3) Oscillateur avec quartz à la résonance (pl.5-c)

Ce montage est inspiré du Colpitts. Le cristal oscille au voisinage de ω_0 .

4) Oscillateur Tri-Tet (pl.5-d)

Il dérive du montage E.C.O. Le tube est ici nécessairement une pentode dont l'écran joue le rôle de plaque pour l'oscillateur. Le circuit de plaque peut dans ce cas être accordé soit sur le fondamental du cristal, soit un harmonique.

5) Montage de Pierce (pl.5-e)

Il ne possède pas de dispositif d'accord, c'est son principal avantage. Le quartz vibre au voisinage de ω_1 . Cet oscillateur fonctionne assez bien jusqu'à environ 10 Mc/s, mais délivre une tension de sortie assez faible. Pratiquement $C_2 < C_1$, C_1 peut même pour les fréquences élevées, être supprimé. La fréquence d'oscillations est déterminée par :

$$LC\omega^2 = 1 + \frac{C}{\Gamma + C_{gp}} \qquad \text{et p doit être tel que} \qquad p = \frac{1}{2_r}\frac{C_1 C_2}{(\Gamma + C_{gp})^2}$$

6) Montage en pont (Mitcham) (pl.5-f) :

Il est très stable et bien adapté aux fréquences basses. Trois des branches du pont sont constituées par des résistances égales R, la quatrième par le quartz. Le cristal vibre sur ω_0 . Si le gain de l'amplificateur est réel et égal à g, la condition d'entretien est telle que :

$$\frac{r}{R} = \frac{g-2}{g+2}$$

7) Oscillateur série - (pl.5-g) :

Ce type d'oscillateur est d'une très grande stabilité. C'est généralement lui qui est utilisé pour les horloges radioélectriques. Dans ce montage, le cristal n'est plus en parallèle sur l'espace interélectrode d'un tube, il n'est donc pas soumis aux éventuelles fluctuations des charges d'espace et il est en conséquence moins tributaire des tubes. La fréquence d'oscillation est telle que :

$$LC\omega^2 = 1 + \frac{C}{\Gamma + C_0} \cdot$$

Précautions à prendre sur les montages oscillateurs.

Un oscillateur quel qu'il soit donne toujours une onde d'autant plus pure que l'on est en limite d'oscillation; par contre, il est alors d'autant plus instable et sensible à la moindre variation venant affecter les différents circuits (variations de charge sur la sortie par exemple). Il en résulte qu'un oscillateur doit toujours être suivi d'un étage séparateur évidemment en Cl.A et très faiblement couplé à l'oscillateur (capacité de liaison faible).

En début de fonctionnement, un oscillateur peut dériver très sensiblement : de quelques 10^{-3} à quelques 10^{-4} pendant la première heure. Il est nécessaire que tous les éléments prennent leur température d'équilibre. Toutefois un oscillateur ayant fonctionné plusieurs heures et brusquement arrêté, puis remis en marche, accuse une nouvelle dérive, cependant beaucoup plus faible.

On devra protéger le bloc oscillateur des variations accidentelles de température, au besoin le thermostater. Un oscillateur est d'une façon générale, à protéger de toutes variations climatiques.

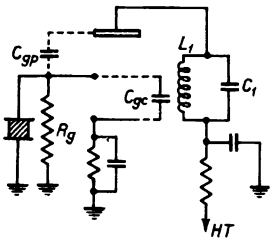
Il devra non seulement être mécaniquement d'une très grande rigidité, mais encore protégé des chocs. Les tubes seront au besoin montés sur suspensions élastiques de même que les quartz dans les oscillateurs où ils sont utilisés.

Les circuits comportant des réglages seront bloqués une fois réglés.

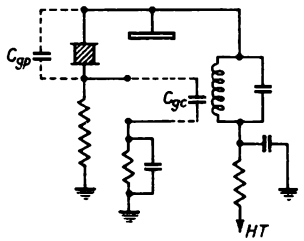
Les principales instabilités sont introduites par les sources d'une part qui devront au besoin être stabilisées, y compris le chauffage des tubes que l'on a intérêt alors à prendre sur accus, et d'autre part, par les variations accidentelles des différents éléments le bruit des tubes réagit sur la fréquence, la qualité et la stabilité dans le temps des selfs et capacités des C.O. doivent être particulièrement soignées; ce sont bien souvent ces éléments les plus responsables (on les choisira à faible coefficient de température).

Les montages ont été indiqués généralement avec des tubes triodes pour plus de simplicité, mais on a toujours intérêt à utiliser des pentodes de forte pente et de faible puissance.

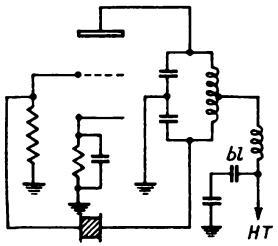
PLANCHE 5 . - OSCILLATEURS A QUARTZ.



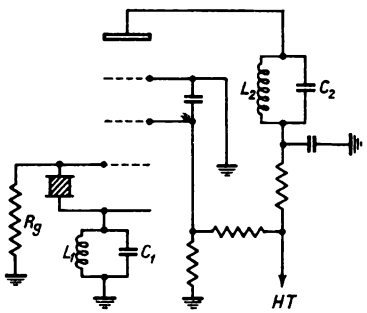
(a)



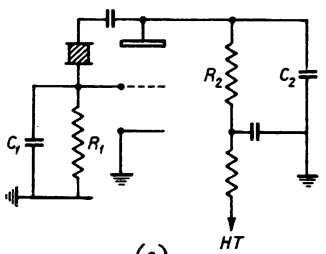
(b)



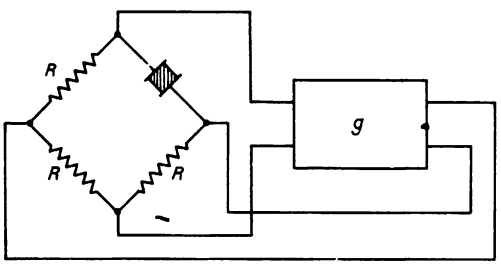
(c)



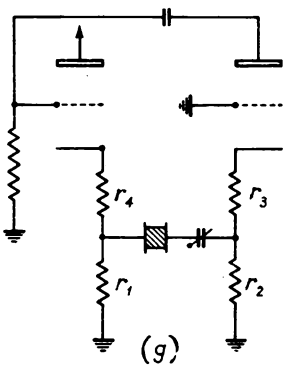
(d)



(e)



(f)



(g)

Dans le cas des oscillateurs à quartz, il importe plus particulièrement de veiller à prendre toutes ces précautions si l'on veut conserver le bénéfice qu'apporte le cristal. Moyennant quoi on peut atteindre des stabilités en fréquence de 10^{-6} voire 10^{-8}. Un paramètre important dans le choix du cristal est son coefficient de température, le choix de la coupe en résulte. La coupe G T donne des coefficients de température très faibles $\frac{\delta f}{f} < 10^{-7}/°C$ mais n'est utilisable que pour les fréquences inférieures à 100 Kc/s. La coupe A T également très bonne permet la réalisation de cristaux de fréquence propre allant jusqu'à 10 Mc/s environ. Les coupes X et Y ont des coefficients beaucoup plus élevés, quelques $10^{-5}/°C$, la coupe Y donne en outre lieu à de brusques variations de fréquence.

La réalisation pratique d'un oscillateur de grande stabilité est délicate. Gagner une puissance de 10 sur la stabilité nécessite toujours la mise en oeuvre de moyens importants et couteux.

Enfin, l'étude des stabilités en amplitude et fréquence et leur interaction mutuelle est un problème assez complexe qui revêt pour chaque type d'oscillateur un aspect particulier. Cette étude est cependant nécessaire dans le cas d'oscillateur à haute stabilité.

MONTAGES DIVERS

Multiplication de fréquence

A partir d'un oscillateur pilote, il est possible d'obtenir des fréquences multiples ayant la même stabilité.

La multiplication de fréquence est basée sur le principe suivant : partant d'une onde sinusoïdale, on modifie la forme de celle-ci, de façon à obtenir un signal riche en harmoniques et l'on prélève à l'aide d'un système sélectif l'harmonique voulu. La création d'harmoniques est obtenue facilement en attaquant un tube en cl. B ou C (fig.49), de sorte que le courant plaque se présente sous forme d'arceaux dont le spectre est connu. La sélection s'opère à l'aide d'un C.O. plaque accordé sur la fréquence désirée.

On choisira l'angle d'ouverture $2\alpha_0$ de façon que l'harmonique cherché ait l'amplitude maximum. On utilisera pour cela les courbes de la fig.1 ou celles de la fig.2. Comme généralement ΔV_g est déterminé par l'étage précédent et constant, c'est surtout la fig.2 qui est utilisée. On détermine ainsi V_{go} d'après $2\alpha_o$, V_c et ΔV_g étant connus. En outre, comme ΔV_g est constant, il est possible d'obtenir une polarisation automatique V_{go} fixe et supérieure , en valeur absolue, au cut-off.

On utilise généralement des pentodes qui ont l'avantage de n'avoir pratiquement qu'une caractéristique I_p, V_g .

Le courant plaque a ainsi une forme pulsée à la fréquence f, en intercalant un C.O. accordé sur n.f., on développera à ses

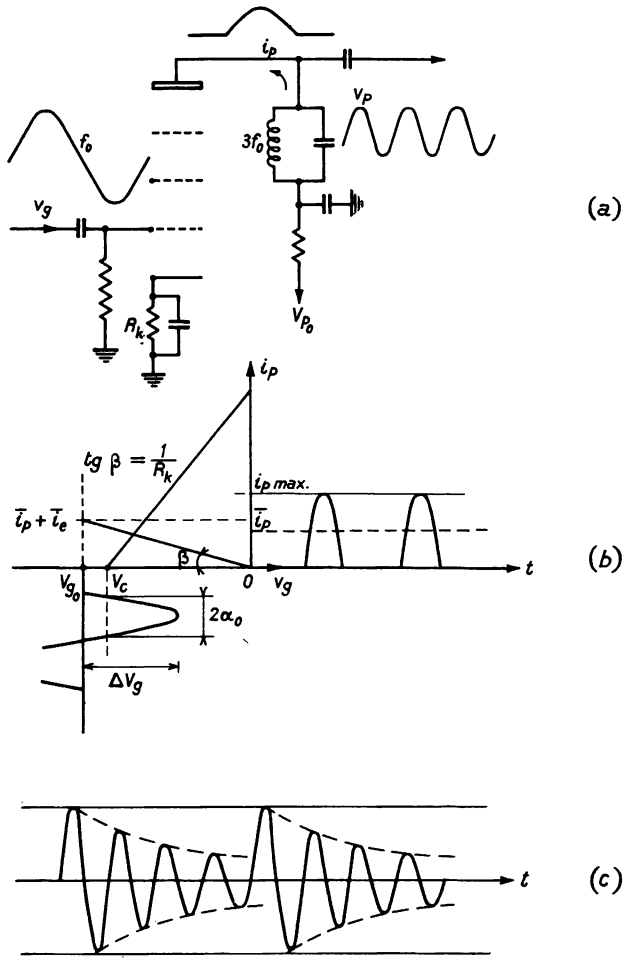


Fig. 49. - Multiplication de fréquence.

bornes une tension sinusoïdale de fréquence n.f. Le C.O. doit évidemment posséder une surtension suffisante pour obtenir une onde pure. La principale difficulté dans un multiplicateur réside dans le fait suivant : le C.O. étant excité par des impulsions de courant de fréquence f, ne fait à chaque impulsion que d'osciller sur sa fréquence propre n.f., mais entre deux impulsions ces oscillations s'amortissent. Si bien, qu'en fait, l'onde obtenue est une onde amortie, et la tension de sortie présente alors l'allure indiquée fig.49, si le décrément logarithmique du circuit $\delta = \text{Log.}\frac{U_p}{U_{p+1}}$ est trop grand, c'est-à-dire $Q = \frac{\pi}{\delta}$ trop faible. Cet amortissement excessif du circuit est généralement apporté par le tube même. On utilisera donc toujours des pentodes. Enfin, si en principe n peut être quelconque, on est pratiquement limité et l'obtention d'une onde correcte dans un quintupleur est déjà

délicate. Une multiplication de fréquence par 6 sera réalisée par tripleur puis doubleur (de préférence à doubleur puis tripleur).

Division de fréquence

Un des montages utilisés à cet effet est indiqué fig.50. Le signal à fréquence f que l'on veut diviser par n (entier) est appliqué sur l'une des grilles d'un tube mélangeur T_1 (hexode par exemple) dans la plaque duquel se trouve un C.O. accordé sur f/n. Si l'on suppose le système en fonctionnement et renvoyer le signal de sortie sur un second tube T_2 fonctionnant en multiplicateur et tel que le C.O. plaque de T_2 soit accordé sur k. f/n (k entier supérieur à 1), après réinjection de la tension de sortie de T_2 sur la deuxième grille de commande de T_1 , il apparaît que le signal de sortie de T_1 résultant du mixtage de f et k. f/n présente une composante à $f - k. \frac{f}{n}$. Pour que cette composante corresponde précisément à f/n, il suffit que k = n - 1. Une division par 5 sera obtenue par réalisation d'un quadrupleur dans la chaîne de réinjection.

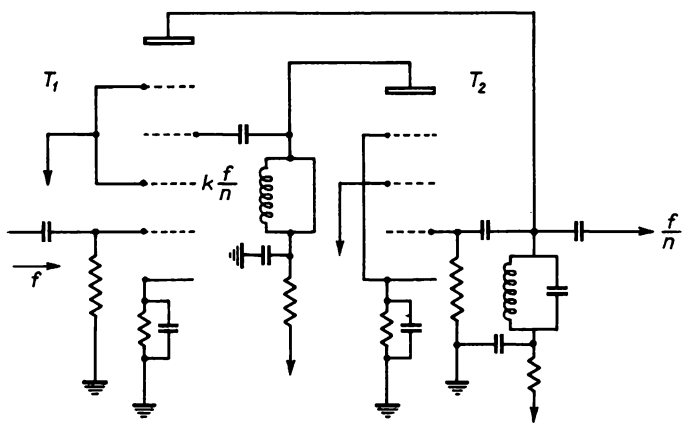


Fig. 50. - Division de fréquence.

LIMITES DANS L'EMPLOI DES TUBES

Limite à l'amplification introduite par Cgp — Stabilité des amplificateurs

Un tube donnant nécessairement un gain limité, on est conduit, pour réaliser un gain en tension donné, à réaliser une chaîne. Il se produit toujours, quoi qu'on fasse, une réaction de la sortie sur l'entrée, de sorte que si le gain en l'absence de réaction est A par étage, il est en fait dans le cas de n étages supposés identiques $g = \frac{A^n}{1 - kA^n}$, la fraction k. S de la tension de sortie S, étant

réinjectée à l'entrée. L'amplificateur tendra à "accrocher" si k.A tend vers l'unité. On voit que k peut être extrêmement faible. Par exemple, dans le cas de 3 étages de gain 10 chacun, il suffit d'une réinjection correspondant au millième de la tension de sortie ($k = A^{-n}$), pour risquer d'accrocher, si la phase est convenable. Quelles que soient les précautions prises, il arrive toujours un moment où, si l'on augmente le gain, des couplages aussi faibles se produisent inévitablement, ne serait-ce précisément que par C_{gp}. C'est ce dernier point de l'influence de C_{gp} que nous allons examiner rapidement.

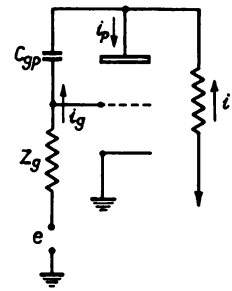


Fig. 51. - Limites dans l'emploi des tubes.

Soit par exemple le montage très général de la fig. 51.

On a, avec les notations indiquées et en supposant qu'il n'y ait pas de débit grille d'une part, et d'autre part que les capacités telles que C_{pc} et C_{gc} sont incorporées à Z_p et Z_g impédances insérées dans g et p :

$$v_p = -Z_p\, i_p \qquad v_g = e - Z_g\, i_g \qquad i = i_p - i_g$$

$$R_i\, i_p = v_p + \mu v_g \qquad i_g = j\, C_{gp}\, \omega\, (v_g - v_p)$$

La résolution de ce système donne pour le gain de l'étage :

$$g = \frac{v_p}{e} = -Z_p \frac{\mu - j\, R_i\, C_{gp}\, \omega}{R_i + Z_g + j\, C_{gp}\, \omega \left[Z_g (R_i + Z_g) + Z_p (\mu Z_g + R_i) \right]} \qquad (1)$$

en supposant avoir une pentode, R_i étant élevé, on peut écrire le dénominateur de g sous la forme suivante, en négligeant les termes en $1/R_i$ et en supposant que Z_g est identique à Z_p (cas fréquent de C.O. identiques dans la grille et la plaque)

$$1 + j\, C_{gp}\, \omega\, (2Z + pZ^2) \quad \text{où} \quad Z = Z_g = Z_p \quad \text{et} \quad p = \mu / R_i$$

le tube entrera en oscillation sur la fréquence ω pour laquelle cette expression est nulle. En tenant compte de l'expression générale de Z pour un C.O. on aboutit dans ce cas, aux deux expressions suivantes :

pour la partie imaginaire

$$\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \left(1 + \frac{C_{gp}}{C} + p\, \frac{C_{gp}\, R}{2C}\right) = 1 \qquad (2)$$

pour la partie réelle

$$\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^4 \left(1 + 2\, \frac{C_{gp}}{C}\right) - 2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \left(1 + \frac{C_{gp}}{C} + \frac{1}{2\, Q^2}\right) + 1 = 0 \qquad (3)$$

où C est la capacité du C.O., R sa résistance parallèle et Q sa surtension.

Lorsque ces deux relations sont satisfaites simultanément, le système entre en oscillation. Comme pratiquement $1 \ll p\, R/2$, (2) se réduit à $\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \left(1 + p\, \frac{C_{gp}\, R}{2\, C}\right) = 1$ et comme $p\, C_{gp}\, R/2\, C < 1$ puisque C_{gp} est supposé très faible, on a pratiquement $\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = 1 - p\, C_{gp}\, R/2C = 1 - \varepsilon$, soit en tenant compte de (3), $\varepsilon = \frac{1}{Q}$. Finale-

ment on accrochera sur $\omega = \omega_0 \sqrt{1-\frac{1}{Q}}$ (4) avec comme condition d'accrochage $p R = 2 C/Q C_{gp}$, comme $Q = R C \omega_0$, cette condition se réduit à: $pR = 2/R C_{gp} \omega$ (5) et p R est précisément le gain de l'étage en l'absence de la réaction introduite par C_{gp}. Soit par exemple $f_0 = 3$ Mc/s ($\omega_0 = 2.10^7$) la fréquence propre des C.O. grille et plaque, un tube de pente p = 2 mA/V et une résistance parallèle des C.O. de 50 KΩ : pR = 100, dans ces conditions, il suffira d'une capacité C_{gp} de 2/100 pf pour que l'amplificateur accroche. L'accrochage dans un pareil cas est pratiquement inévitable. On voit les précautions qu'il faut prendre en ce qui concerne le câblage pour ne pas accroître la capacité C_{gp} propre au tube utilisé. Nous avons pris comme exemple le cas d'un C.O. dans la grille et la plaque, un montage un peu différent peut s'y ramener : c'est celui de deux étages à C.O. accordé dans la plaque (fig. 52). Lorsque R_g est grand devant Z_{p_1}, c'est pratiquement Z_{p_1} qui se trouve dans la grille de T_2 et les résultats précédents sont applicables. Notons au passage l'identité complète du cas particulier traité comme exemple avec le montage T.P.T.G. Dans le cas où Z_g et Z_p ne sont pas des C.O. la relation générale (1) reste valable et permet de se faire une idée des risques possibles d'accrochage. Enfin, lorsque l'on est près de l'accrochage sans toutefois osciller, en reprenant l'exemple précédent de C.O. plaque et grille, on voit, en tenant compte de (5) très sensiblement satisfait puisque l'on est en limite, et en remarquant que $Z_g = Z_p = R$, que g devient $g = \frac{pR}{1+2j}$ soit $|g| = p R/\sqrt{5}$. Ainsi le gain sur la fréquence d'accord est considérablement réduit. Dans l'exemple pris, il serait $g = 100/\sqrt{5} \neq 45$. Le maximum d'amplification aurait lieu sur une fréquence plus basse, voisine de celle donnée par (4).

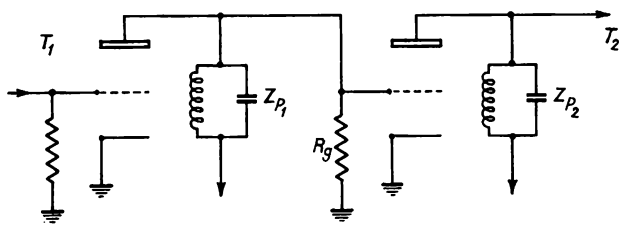


Fig. 52. - Limites dans l'emploi des tubes.

Du point de vue amplification, l'effet de C_{gp} apporte donc un risque d'accrochage et une réduction du gain. La capacité grille-plaque apporte ainsi une limitation dans l'utilisation des tubes en amplificateur pour les hautes fréquences.

Limite à l'amplification introduite par le bruit propre des tubes.

L'émission thermionique de la cathode d'un tube est par nature même discontinue. Il en résulte que le courant émis fluctue autour d'une valeur moyenne. A ceci, il faut ajouter les fluctuations qui apparaissent dans la répartition des potentiels à l'in-

térieur même du tube, et les fluctuations dues au phénomène d'émission secondaire des isolants internes lorsque ceux-ci sont frappés par le faisceau. De même le vide plus ou moins parfait des tubes fait que des ions positifs apparaissent à la suite des chocs entre électrons et molécules gazeuses entraînant des fluctuations de la charge d'espace. Dans les tubes multigrilles, une cause supplémentaire de bruit apparaît avec les fluctuations que subit la répartition du courant entre les différentes électrodes positives. Une autre cause de fluctuation intervient avec l'émission par tache de certaines cathodes principalement les cathodes à oxyde (effet de scintillation). Enfin, à ces différentes causes, il faut ajouter les fluctuations dues à l'agitation thermique des électrons dans les conducteurs. Si tous ces phénomènes sont peu importants dans le cas où le signal d'entrée est déjà d'amplitude notable, ils deviennent non négligeables, et parfois même prépondérants dans le cas d'un signal faible à amplifier (étage préamplificateur) et peuvent même rendre impossible toute amplification utile du signal, celui-ci étant à la sortie du tube noyé dans un bruit de fond duquel on ne peut le sortir. Le bruit apparait ainsi comme une nouvelle limitation à l'amplification.

Parmi les diverses fluctuations signalées, les deux causes principales de bruit restent celles apportées par l'émission même et les conducteurs.

En ce qui concerne les conducteurs, rappelons simplement la relation bien connue de Nyquist donnant la valeur du carré moyen e de la f.e.m. d'agitation thermique aux bornes d'une résistance R pour un intervalle de fréquence $f_2 - f_1 = \Delta f$: $\overline{e}^2 = 4\,k\,T\,R\,\Delta f$ (k : Cte de Boltzmann, T température absolue du conducteur). Soit $\overline{e}^2 = 1{,}6\ 10^{-20}\ R.\Delta f$ à la température ambiante.

(R en ohm , Δf en c/s, e en volt). Dans le cas d'une impédance Z complexe, c'est la partie réelle du Z qui se substitue à R dans l'expression de $\overline{e}^2$. (1)

Pour un tube la principale cause de bruit ayant cette origine est celle apportée par le circuit grille. La tension e développée à ses bornes bénéficie en effet du gain au même titre que le signal.

En ce qui concerne les fluctuations de l'émission proprement dite, si I est le courant émis par la cathode, le carré moyen des fluctuations $\overline{i}^2$ est $\overline{i}^2 = 4\,K\,e_0\,I\Delta f$ (e_0 = charge de l'électron, K facteur sans dimension caractéristique du tube). En exprimant les courants en ampères, on a $\overline{i}^2 = K\ 3{,}2\ 10^{-19}\ I\Delta f$. On ramène cette fluctuation de I dans le circuit de grille de façon à pouvoir comparer son effet à celui du circuit d'entrée. A $\overline{i}^2$ correspondrait ainsi dans la grille une fluctuation $\overline{\varepsilon}^2 = K\frac{1}{p^2}\,2\,e_0\,I\Delta f$, p étant la pente du tube. On a donc sur la grille du tube une fluctuation $\overline{E}^2 = \overline{e}^2 + \overline{\varepsilon}^2$, soit : (Rg étant la résistance de grille)

$$\overline{E}^2 = 4\,k\,T\left[R_g + \frac{K e_0 I}{2\,k\,T p^2}\right]\Delta f.$$

(1) Dans le cas d'un C.O. ou d'un R parallèle, l'intégration de $\overline{e}^2$ donne pour expression du bruit total : $\overline{E}^2 = \frac{k\,T}{c} = 2\pi\,k\,R\,T\,B$ où B est la bande à 3 dbs.

L'expression $K\ e_0 I/2\ d\ T\ p^2 = R_b$ est la résistance équivalente de bruit du tube (dans cette expression T n'est pas la température de la cathode, mais celle du circuit d'entrée, c'est-à-dire pratiquement l'ambiante). La résistance équivalente de bruit est donc la résistance qui, placée dans le circuit de grille du tube supposé parfait, apporterait le même bruit que le tube réel.

En écrivant $R_b = BI/p^2$, (I/B homogène à une tension) un tube présente d'autant moins de bruit que I/p^2 est faible. Dans l'ignorance de la valeur exacte de R_b, on pourra entre deux tubes choisir celui dont le I/p^2 est le plus faible. D'où l'intérêt pour les préamplificateurs des tubes de faible puissance (I faible) et de grande pente. Dans les conditions usuelles, on aura ainsi un bruit à l'entrée $\overline{E^2} = 1{,}6.10^{-20}\ (R_g + R_b).\Delta f$, ($R_g$, R_b en ohm, Δf en c/s et E en volt).

On donne dans le tableau 3 la résistance de bruit de quelques tubes.

TABLEAU III

Genre	Tube	R_b (0hm)	p (mA/V)
Triode	6 J 5	1000	2,6
Pentode en triode	6 AC 7	300	11
	6 AK 5	400	7
Pentode	6 AC 7	700	9
	6 AK 5	2000	5
	E F 42	2000	9,5
Mélangeur	6 K 8	250000	0,3

Prenons par exemple une E F 42, $R_b = 2000\ \Omega$; supposons $R_g = 8000\ \Omega$ et $\Delta f = 1$ Mc/s, on a $E = 13\ \mu V = b$. Si le signal S est tel que l'on doive travailler avec un rapport signal/bruit S/b = 10, S devra être au moins de 130 μV.

Les autres causes de bruit (émission secondaire des isolants, effet de scintillation) sont par construction réduites au minimum, de sorte que les deux causes envisagées ici sont les principales. L'effet de scintillation apporte d'ailleurs les composantes de bruit à fréquence relativement basse, généralement inférieure à 10 Kc/s.

On peut noter d'après le tableau 3 que la multiplicité des grilles dans un tube augmente le bruit, en comparant par exemple 6 AC 7 en triode, 6 AC 7 et 6 K 8, cette dernière étant une hexode.

Influence du degré de vide d'un tube.

Le degré de vide peut être très variable d'un tube à un autre. Si l'on alimente un tube triode par exemple, à tension plaque fixe et si l'on relève la courbe $I_g = f(Vg)$ du courant grille, on trouve une caractéristique ayant l'allure indiquée fig. 53 pour Vg négatif $< Vo$ (courant inverse de grille) : les ions positifs créés par le courant plaque sont recueillis par la grille et partant de Vg = O,

ceci se produit d'autant plus que Vg devient négatif, puis à partir d'un certain moment (Ig_m , Vg_m), I_p diminuant le nombre d'ions créés décroît et Ig diminue à son tour. Entre zéro et V_o on a un courant électronique.

On caractérise le degré de vide d'un tube par le rapport $I_{gm} / I_{po} = f_v$ (facteur de vide), f_v doit être le plus petit possible. Il est généralement de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-6}. Pour I_{po} = 10 mA par exemple avec $f_v = 10^{-4}$, on a I_{gm} = 1 µA. Si Vg_m = 2 volts par exemple, ceci revient à dire que l'espace cathode grille a une résistance équivalente de 2 MΩ (1). Comme par ailleurs, l'ionisation produite est assez instable (tant au cours du fonctionnement instantané qu'au cours de la vie du tube), l'espace cathode grille l'est également. La résistance de fuite R_g insérée dans la grille devra donc être inférieure à cette valeur, de façon à fixer l'impédance entre c-g d'une part, et d'autre part, si R_g est trop élevé, non seulement l'impédance d'entrée sera tributaire de celle de l'espace c-g, mais le courant de vide se refermant par R_g modifiera la polarisation du tube, d'une façon d'ailleurs aléatoire, amenant ainsi des instabilités et apportant en outre d'importantes modifications dans le fonctionnement.

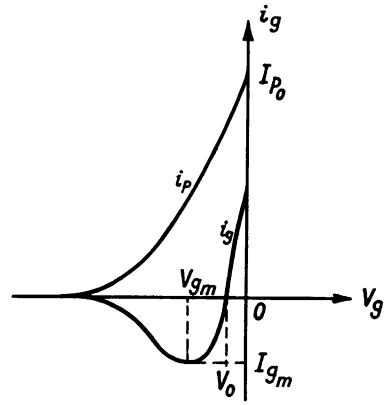


Fig. 53.- Degré de vide.

Un tube mal vidé présente, en général, une lueur bleuâtre, un tube dans lequel l'air a pénétré à la suite d'un défaut de scellement par exemple, des lueurs violacées. Si les gaz résiduels sont importants, on arrive à la limite à une véritable décharge à l'intérieur du tube (fonctionnement ionique).

La mesure de f_v est assez délicate, des fuites à travers le support du tube pouvant venir modifier le courant inverse d'une façon non négligeable.

Il ne suffit donc pas d'insérer dans le grille une impédance élevée pour avoir une grande impédance d'entrée, même aux fréquences basses. Ceci sans même parler des fuites du support. La résistance maximum à insérer dans le circuit grille est souvent donnée dans les catalogues, elle est généralement de l'ordre de MΩ.

Limitation des tubes classiques du côté des très hautes fréquences.

Indépendamment de C_{gp} dont le rôle particulier a été vu, pour les très hautes fréquences, en plus des différentes capacités interélectrodes, les selfs des connexions internes du tube interviennent. Les constantes des circuits cessent d'être localisées pour devenir

(1) Ceci n'est pas rigoureux mais fixe les idées.

des constantes réparties le long des différents éléments. La répartition des potentiels varie le long des connexions et des électrodes; il n'y a plus entre entrée et sortie opposition de phase; il est de plus en plus difficile d'adapter la charge de sortie au tube, les grilles g_2 et g_3 ne peuvent plus jouer leur rôle, n'étant plus à des potentiels H.F. nuls, etc... Il en résulte un fonctionnement tout différent du tube, que nous nous bornons à signaler.

Un autre phénomène intervient également : le temps mis par les électrons pour aller d'une grille à une autre (temps de transit) devient de l'ordre de grandeur de la période, par exemple pour des fréquences de 100 Mc/s cet effet est déjà sensible sur certains tubes. Il en résulte des échanges d'énergie entre le faisceau et les sources alternatives qui ne se produisaient pas sur les fréquences plus basses. On assiste alors à des pertes d'amplification ou des impossibilités d'oscillation. Quoi qu'il en soit, le fonctionnement même du tube devient là encore très différent. Les tubes classiques cessent d'être valables pour les très hautes fréquences, et les techniques elles-mêmes changent.

UTILISATION DES TUBES EN « TOUT OU RIEN »

A côté du fonctionnement classique des tubes en cl. A, B ou C, la technique utilise chaque jour un peu plus des systèmes où les tubes sont très loin de travailler dans les conditions vues jusqu'ici. Ces montages peuvent être classés sous la dénomination très générale de fonctionnement par "Tout ou Rien". Le tube n'a dans ces systèmes que deux états possibles qu'il occupe alternativement : bloqué ou débloqué. Les montages utilisant deux tubes T_1 et T_2 fonctionnant ainsi, et dans lesquels lorsque T_1 est bloqué T_2 soit débloqué, et réciproquement, présentent alors deux états possibles : a (T_1 débloqué, T_2 bloqué) et b (T_2 débloqué, T_1 bloqué) dont les propriétés peuvent être très différentes suivant la nature de ces deux états. On peut classer ces montages en trois catégories :

- Montages astables : a et b sont instables
- Montages monostables : a (ou b) stable, b (ou a) instable
- Montages bistables : a et b stables.

Montage astable.

Le montage type est le multivibrateur d'Abraham et Bloch (fig. 54-a); c'est aussi le plus ancien. Le fonctionnement en est le suivant : Si T_1 fonctionne, I_1 augmentant par exemple, V_1 décroît, la variation de V_1 transmise par C_1 à T_2 provoque une diminution de I_2 donc, un accroissement de V_2 qui transmis par C_2 à T_1 tend à accroître encore I_1. Toute augmentation de I_1 provoque une nouvelle augmentation de I_1 conduisant au blocage de T_2 ($I_2 = 0$). Lorsque la charge de C_2 à travers ρ_1, R_2 est terminée; la grille de T_1 se trouve portée à un potentiel négatif qui provoque

une diminution de I_1 donc un accroissement de V_1 qui va débloquer T_2 au moment où l'on dépassera le Cut-off V_c de T_2, alors I_2 croît, etc... Le processus étant le même que pour I_1 au début.

Si V_{po} est la H.T. extérieure, V_c le cut-off, V_{go} la polarisation grille extérieure et V_p la tension plaque par rapport à la cathode lorsque C_1 et C_2 sont déconnectés, le temps τ_1 pendant lequel T_1 est débloqué est lorsque la fréquence de récurrence est assez faible (jusqu'à 1 Kc/s)

$$\tau_1 \neq \rho_1 C_2 \ \text{Log} \ \frac{V_{p0} - V_{p1} + V_{g0}}{V_{g0} + V_{C_2}}$$

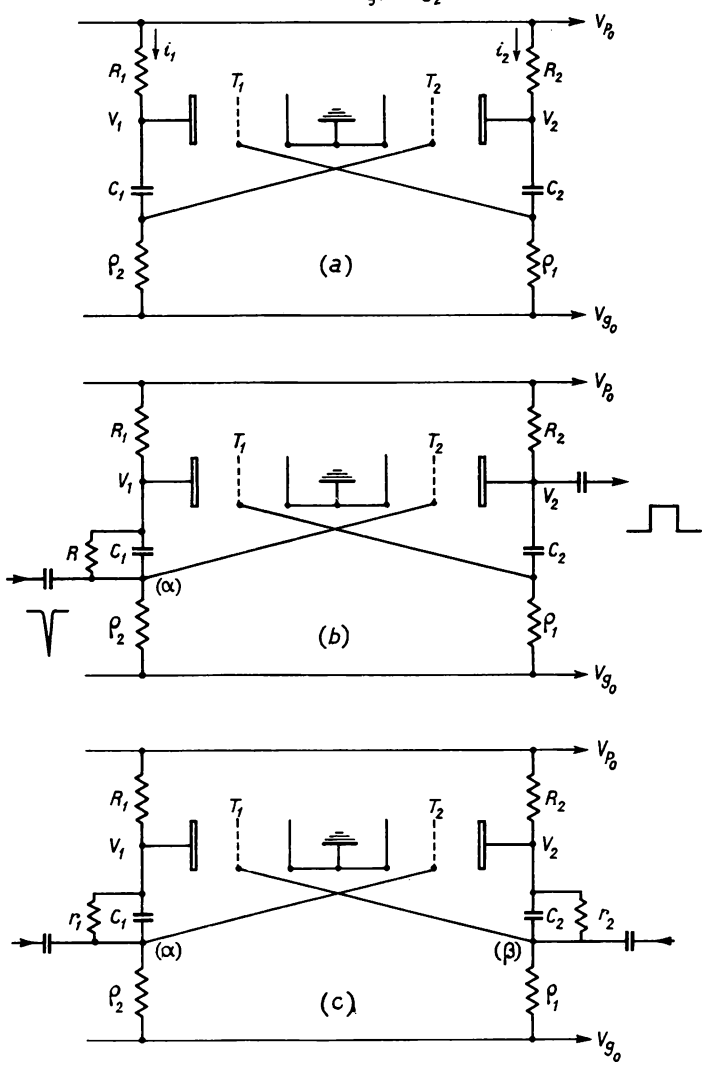


Fig. 54. - a) Astable - b) Monostable - c) Bistable.

Tandis que T_2 est débloqué pendant τ_2

$$\tau_2 \neq \rho_2 C_1 \text{ Log } \frac{V_{p0} - V_{p2} + V_{g0}}{V_{g0} + V_{c1}}$$

pour $f > 1$ Kc/s et jusqu'à quelques dizaines de Kc/s, on a :

$$\tau_1 \neq \rho_1 (C_2 + C_{gC}) \text{ Log } \left[\frac{V_{p0} - V_{p2} + V_{g0}}{V_{g0} + V_{c2}} \cdot \frac{C_2}{C_2 + C_{gC}} \right]$$

τ_2 s'obtient en permutant les indices.

Le multivibrateur apparaît comme un générateur d'ondes rectangulaires, malheureusement comme tout oscillateur à relaxation, il est peu stable. On peut remarquer que les sources déterminent les valeurs des durées, elles devront être stables de même que le chauffage des tubes. Enfin, on a intérêt à prendre V_c faible et V_{g0} élevé.

Montage monostable.

Le montage type dit univibrateur est celui de la fig.54-b. Si en parallèle sur C_1 on met R de sorte que le pont R, R_1, ρ_2 pris sur V_{p0} et V_{g0} soit tel que la grille de T_2 soit au voisinage du potentiel zéro (ce qui suppose V_{g0} négatif), dans cet état T_2 est conducteur et T_1 au cut-off, le système est stable et au repos. Si on applique alors sur l'entrée une impulsion négative, I_2 décroît et V_2 croît. Cette impulsion positive est transmise par C_2 à T_1 qui est ainsi débloqué, V_1 diminue et le potentiel en (α) décroît également maintenant ainsi T_2 bloqué, la fin de charge de C_2 à travers R_2 ρ_1 amène le nouveau blocage de T_1, donc le déblocage de T_2, le montage est alors à nouveau dans sa position d'équilibre stable jusqu'à l'arrivée d'une nouvelle impulsion sur T_1.

L'impulsion négative d'entrée est "restituée" à la sortie sous la forme d'un créneau positif. La durée τ de ce signal ne dépend que des constantes du montage, seule sa position dans le temps est déterminée par l'entrée.(1) La présence de C_1 n'est pas indispensable, mais favorise les fronts raides.

Montage bistable

Un montage bistable classique est celui de la fig.54-c rencontré sous le nom de bascule ou flip-flop (Eccles-Jordan). Ces montages sont à la base des compteurs d'impulsions. T_1 et T_2 étant supposés enlevés, imaginons régler le pont constitué par ($R_1 + r_1$), ρ_2 et ($R_2 + r_2$), ρ_1 de telle sorte que (α) et (β) se trouvent à un potentiel nul par rapport à la masse.

Si on introduit T_1 et T_2, l'un des tubes T_1 par exemple devenant conducteur avant T_2, V_1 diminuera et bloquera T_2 si R_1 est suffisant pour que (α) parvienne à un potentiel inférieur à V_c. Le système est alors dans un état stable (T_1 conducteur, T_2 bloqué).

(1) En dérivant l'onde de sortie on obtient deux impulsions, la seconde (négative) correspond à l'impulsion de déclenchement retardée de τ. On utilise parfois ce dispositif pour retarder une impulsion.

Une impulsion positive sur la grille de T_2 ou négative sur celle de T_1 fera basculer le système qui se trouvera dans l'état inverse du premier, soit, T_2 conducteur et T_1 bloqué, mais tout aussi stable. R doit être tel que les gains des tubes soient suffisants pour pouvoir opérer le blocage; par ailleurs $\rho = 2$ à 3 r permet un fonctionnement correct. V_{g0} ne doit pas être trop négatif, sinon les tubes ne se bloquent plus l'un l'autre, ni trop faible, sinon le montage fonctionne comme un multivibrateur.

Les montages monostables et bistables sont groupés sous le nom de "trigger".

Les montages « ET et OU »

Ces dispositifs sont à plusieurs entrées - soit par exemple deux - et ne comportent qu'une sortie. Les montages ET (gate) ne délivrent un signal de sortie que si les deux entrées sont excitées simultanément. Les montages OU (mélangeur) ne délivrent un signal de sortie que si l'une ou l'autre des entrées est excitée.

Montage « ET » à pentode (Fig. 55 *a*)

Soit par exemple une pentode polarisée à $V_{g0} = V_c$ (quelques volts) polarisons alors g_3 à $V_{g3} < 0$ (quelques dizaines de volts) de façon à annuler I_p quelque soit le signal positif appliqué sur g_1. L'excitation positive simultanée de g_1 et g_3 débloque le tube et I_p devient différent de zéro, V_p qui était égal à V_{p0} diminue et l'onde de sortie correspond au recouvrement des deux signaux d'entrée. Une impulsion positive quelconque appliquée par contre à g_1 ou g_3 ne débloquera pas le tube d'après les réglages de V_{g3} et V_{g0}. Le principal inconvénient de ce montage à un seul tube est que les grilles g_1 et g_3 sont très différentes tant en sensibilité (pente) qu'en cut-off.

Montage « ET » à double triode.

Le montage est celui de la fig. 55-b. V_{g0_1} est tel que T_1 soit conducteur et, V_{g0_2} tel que T_2 soit un peu au-delà du cut-off. Si un signal négatif d'amplitude suffisante arrive sur T_1, I_{p1} diminue et le potentiel de cathode se rapproche de la masse, la polarisation de T_2 soit $V_{g0_2} - R_K I_{p1}$ croît et T_2 qui était un peu au-delà du cut-off vient à V_c, si à ce moment un signal positif parvient sur T_2, T_2 devient conducteur et V_2 diminue, le signal de sortie est négatif. Le signal agissant sur T_1 agit comme déblocage du système et c'est le signal entrant sur T_2 qui passe à travers l'ensemble et est amplifié par T_2.

Montage « OU » à pentode (Fig. 55 c).

Le montage est identique au ET à pentode, mais les polarisations sont telles que le tube est en permanence débloqué. Si un

signal négatif apparaît sur g_1 ou g_3, il en résulte une diminution de I_p d'où un signal positif à la sortie. Dans les montages ET et OU à pentode, on peut au lieu de g_1 et g_3 utiliser g_1 et g_2.

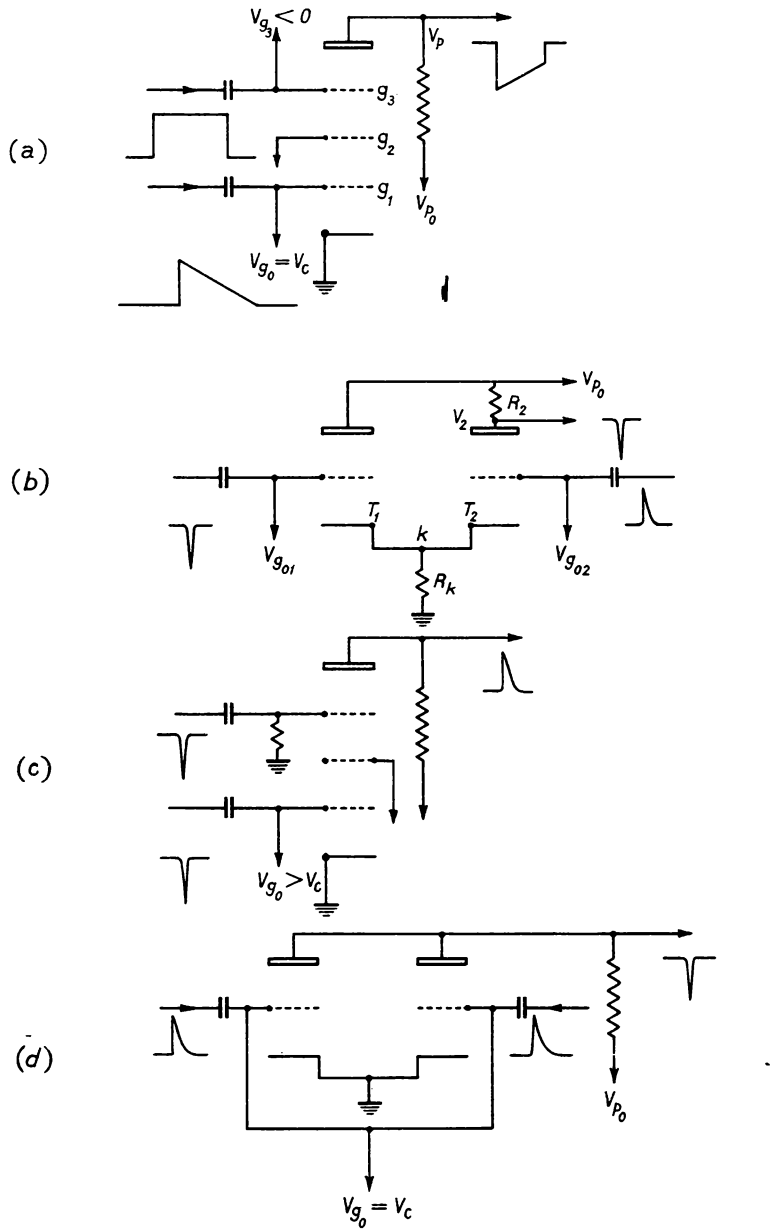


Fig. 55. -(a) "ET" à pentode -(b) "ET" à double triode -(c) "OU" à pentode (d) "OU" à double triode.

Montage « OU » à double triode.

Le montage est celui de la fig. 55-d. Les tubes sont polarisés au cut-off, donc bloqués. Si un signal positif attaque la grille de T_1 ou T_2, le tube correspondant est débloqué et une impulsion négative apparaît sur les plaques communes.

MONTAGES DIVERS

Intégrateur de Miller.

Tout système intégrateur fait apparaître une réponse en $1 - e^{-\frac{t}{\theta}}$ dont on utilise une portion plus ou moins grande $\frac{\Delta t}{\theta}$. La linéarisation est d'autant plus parfaite que $\frac{\Delta t}{\theta}$ est faible. L'intégrateur de Miller utilise la capacité ramenée à l'entrée d'un tube $(I + |g|) C_{gp}$ pour accroitre artificiellement θ. Le montage est indiqué fig. 56. C_{gp} y est en outre accru artificiellement par l'introduction de C. Le schéma équivalent auquel se réduit le système est celui de la fig. 56-a, alors qu'un intégrateur R C ordinaire serait équivalent à la fig. 56-b. L'intégrateur de Miller donnera une réponse $S = E \frac{g}{1 + j(1 + g) R C\omega}$ tandis que le montage simple classique donnerait $S = E \frac{1}{1 + j R C\omega}$, l'approximation est dans le premier

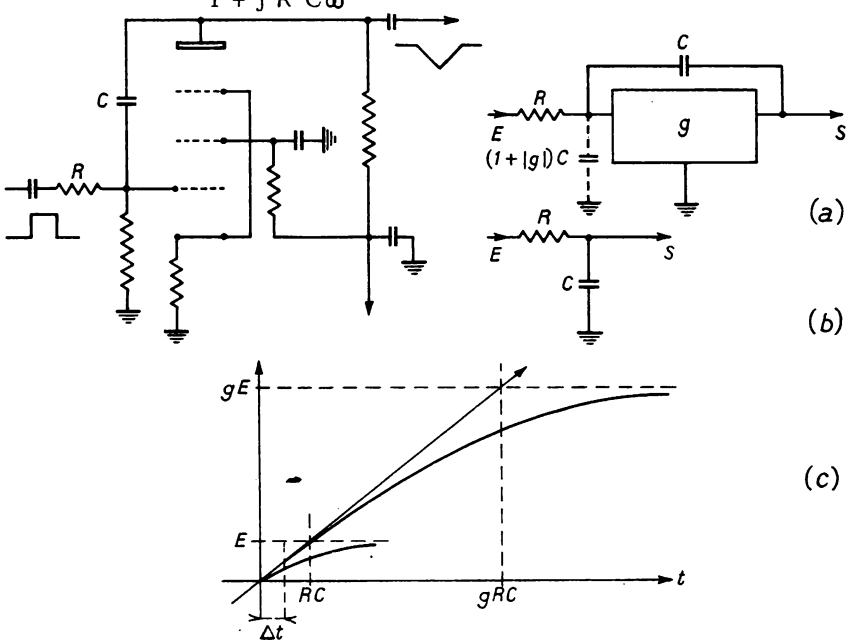


Fig. 56. - Intégrateur de Miller.

cas $1 \ll [(1 + g)\, R\, C\omega]^2$ et dans le second cas $1 \ll (R\, C\, \omega)^2$, à R C égaux, l'effet d'intégration est plus parfait dans l'intégrateur de Miller. L'allure des deux réponses est indiquée sur la fig. 56-c. La linéarisation est accrue pour un même Δt par ailleurs, la pente à l'origine reste la même dans les deux cas.

Oscillateur Miller transistron (Fig. 57).

Un intégrateur de Miller (C) auquel on adjoint un circuit transitron (couplage de g_2 et g_3 par γ) constitue un "oscillateur dents de scie" d'une grande linéarité, g_3 est relié à la cathode par R_s et g_1 à la H.T. par une résistance de forte valeur R_g (plusieurs MΩ). Si l'on suppose appliquer la H.T. V_{p0}, l'impulsion apparaissant sur g_1 est intégrée par effet Miller et la plaque portée brusquement à V_{p0} au début voit son potentiel décroître linéairement. I_p diminuant, parallèlement, I_{g2} tend à augmenter (I_p et I_{g2} variant en sens contraire dans une pentode) et V_{g2} diminue, lorsque V_p atteint la région avoisinant la tension de déchet, I_p tombe brusquement tandis que I_{g_2} croit brutalement entrainant une chute brusque de V_{g2}, cette impulsion négative est transmise par γ à g_3 qui bloque ainsi le tube. La plaque est alors reportée à V_{p0} et le cycle recommence. Les deux constantes de temps du système sont déterminées par R_p R_g et C d'une part et R_s, γ et R_e d'autre part (temps de retour). L'introduction d'une résistance de cathode R_K permet de contrôler l'amplitude de sortie.

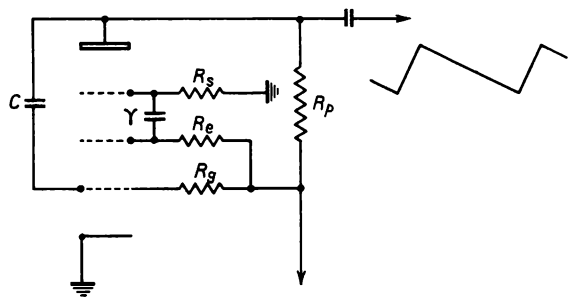


Fig. 57. - Oscillateur Miller - Transitron.

Diviseur à univibrateur.

Si l'on reprend le schéma de l'univibrateur fig. 54-b, et si l'on suppose qu'il arrive sur l'entrée n impulsions négatives par unité de temps, la première va faire basculer le système à $t = t_0$ (fig. 58). Si les constantes de temps de la bascule sont telles que T_2 reste bloqué pendant un temps θ légèrement supérieur à k/n, les k - 1 impulsions suivant la première n'auront aucune action sur le système, seule celle arrivant à $t_1 = t_0 + (k + 1)/n$ débloquera à nouveau le système qui entre k et k + 1 est revenu à sa position d'équilibre, de sorte que là ou il y avait k impulsions négatives on ne recueille qu'un créneau. Il y a eu division par k. Ce créneau pourra subir une transformation quelconque, par exemple un circuit sélectif accordé sur la fréquence de récurrence

des créneaux (en supposant les impulsions origine périodiques) délivrera une sinusoide de même fréquence. Ce procédé de division de fréquence n'a toutefois pas la stabilité de celui indiqué fig. 50; par contre il permet d'obtenir une fréquence $f = \frac{p}{k} F < F$ avec p et k entiers, par exemple dans le cas de la fig. 58 où k = 4, en sélectionnant l'harmonique 3 du rectangle, on peut obtenir $f = \frac{3}{4} F$. Une différenciation des créneaux suivie d'un écrêtage du type suivant redonnerait des impulsions de même signe que celles d'entrée (négatives), mais de fréquence de récurrence k fois plus faible.

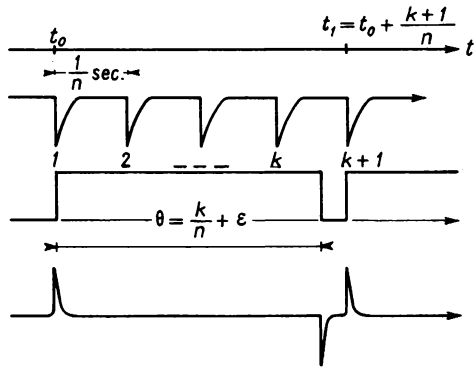


Fig. 58. - Division de fréquence par univibrateur.

Ecrêtage par triode ou pentode.

Le montage est très couramment utilisé. Le tube de préférence du genre pentode (I_p indépendant de V_p, cut-off unique, gain élevé) est polarisé à $V_{g0} = V_c/2$ (fig. 59-a) et attaqué par un signal de grande amplitude. Il y a d'une part écrêtage par cut-off et d'autre

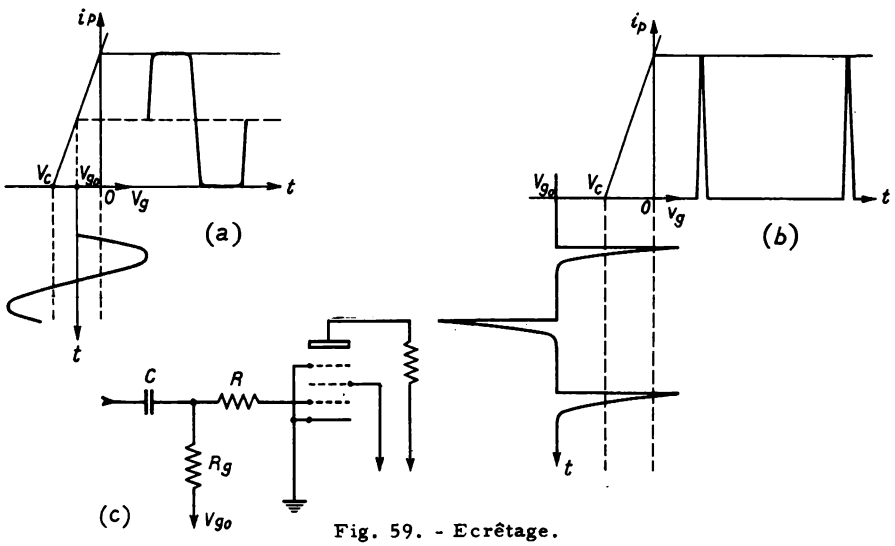


Fig. 59. - Ecrêtage.

part par débit grille. La résistance R est de valeur élevée (100 kΩ ou 200 KΩ) de façon à accroître artificiellement la résistance interne de la source délivrant le signal d'attaque apportant ainsi un effet de choc et protégeant également la grille. Une sinusoïde de grande amplitude peut être ainsi transformée en carré plus ou moins parfait. Les carrés du cas précédent différenciés d'une part par R_g , C ; par exemple, attaquant un système de ce genre polarisé au-delà du cut-off (fig. 59-b) sont transformés de telle sorte que seules les pointes positives passent et apparaissent en négatif à la sortie ($v_p = - R_p\ i_p$). Ces écréteurs ont l'avantage sur les écréteurs à diode de restituer un signal amplifié.

REMARQUE. - Un générateur d'onde en dents de scie très simple pouvant dans bien des cas rendre des services est indiqué fig. 60. Le système R C se charge sous U, au moment où le potentiel v aux bornes de C atteint V_0 , tension d'amorçage du tube à gaz. C est mis en court-circuit et se décharge jusqu'en u tension de désamorçage du tube, puis le cycle recommence. Une résistance r doit être insérée en série avec le tube pour limiter le courant de décharge. Les deux constantes de temps sont ainsi R C et r C. L'onde est d'autant plus linéaire que $V_0 \ll U$. Un tel dispositif marche très bien jusqu'à plusieurs milliers de c/s.

On a : $t_2 - t_1 = R\ C\ \text{Log}\dfrac{U - u}{U - V_0}$ et, $t_3 - t_2 = r\ C\ \text{Log}\dfrac{V_0}{u}$.

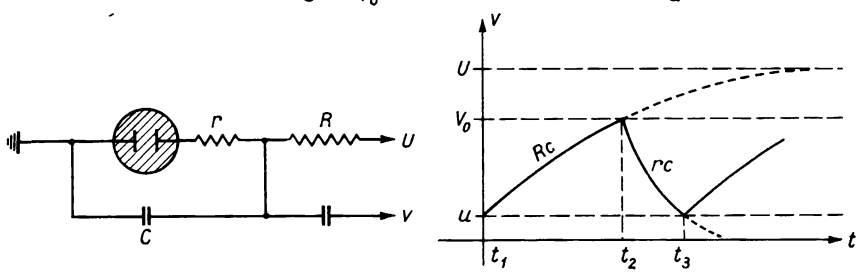


Fig. 60. - Phénomène de relaxation.

Nous avons indiqué brièvement dans de paragraphe divers montages classiques, bien d'autres existent. Nous limitons là leur énumération et l'exposé de leur principe, le reste étant une question d'imagination.

AMPLIFICATEURS H. F. DE PUISSANCE

Amplificateur Cl. B. (Fig. 61).

Le tube est polarisé à $V_{g0} = V_c$. Un C.O. est inséré dans la plaque. La résistance parallèle R_p représente la charge du circuit, c'est-à-dire la puissance prélevée au circuit et fournie à l'extérieur, cette résistance vient amortir le circuit. Le rôle du tube est de transformer la puissance fournie par V_{p0} sous forme continue ($V_{p0} \cdot \overline{i_p}$) en puissance alternative ($1/2\ \Delta v_p \cdot \Delta i_{p1}$) de pulsation ω_0 . La tension d'excitation grille est par exemple fournie par une autre C.O. dont la tension aux bornes est $v_g = \Delta v_{pg} \sin \omega_0 t$.

On a représenté fig. 61 la caractéristique dynamique Δ. C'est toujours une droite (même dans le réseau non idéalisé) dans I_p, V_p. La grille peut être par instant portée à des potentiels positifs. Il y a alors débit grille et une certaine puissance de commande doit être fournie au tube.

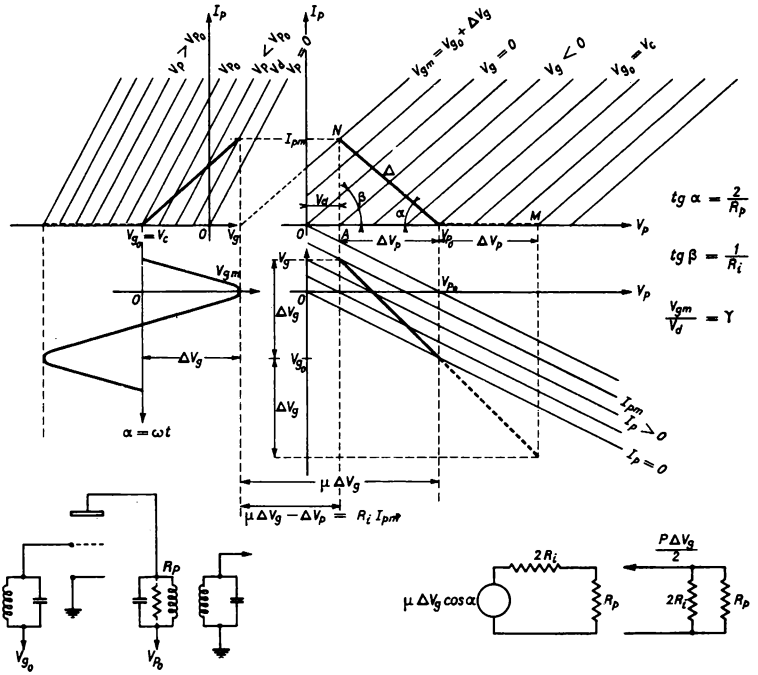


Fig. 61. - Classe B.

D'après les spectres vus précédemment, on a :

$\overline{i_p} = i_{pm}/\pi$ et $\Delta i_{p1} = I_{pm}/2$, la puissance utile est $P_u = \frac{\Delta V_p}{\sqrt{2}} \frac{\Delta i_{p1}}{\sqrt{2}}$

soit $P_u = \Delta V_p . I_{pm}/4$, comme on a également $P_u = \left(\frac{\Delta V_p}{\sqrt{2}}\right)^2 \frac{1}{R_p}$ on a $R_p = \frac{2\Delta V_p}{I_{pm}}$ d'où la droite de charge Δ définie par $tg\,\alpha = 2/R_p$.

La puissance fournie par la source est $P_s = V_{p0} . i_p$ soit $P_s = V_{p0} . I_{pm}/\pi$.

La puissance dissipée sur le plaque est $P_p = P_s - P_u = I_{pm}\left[\frac{V_{p0}}{\pi} - \frac{\Delta V_p}{4}\right]$ et le rendement $\eta = P_u/P_s = \frac{\pi}{4}\frac{\Delta V_p}{V_{p0}}$, le maximum possible de η soit lorsque A vient en C donne $\eta_{lim} = \frac{\pi}{4}$ soit sensiblement 78%. Généralement V_d (tension de déchet) étant de l'ordre de 20% de V_{p0}, on a $\Delta V_p = 0{,}8\ V_{p0}$ soit un rendement de l'ordre de 60%.

On a entre les différentes grandeurs la relation $R_i I_{pm} = \mu \Delta V_g - \Delta V_p$ comme $i_p = p_d v_g$ (où p_d est la pente dynamique) et

que le réseau est idéalisé, c'est-à-dire que $I_{pm} = p_d . \Delta V_g$, $R_i I_{pm} = \mu \Delta V_g - R_p \Delta i_{p1}$, soit $I_{pm} (R_i + R_p/2) = \mu . \Delta V_g$, donc

$$p_d = \frac{\mu}{R_i + \frac{R_p}{2}} \quad \text{et} \quad \Delta i_{p1} = \frac{1}{2} \frac{\mu}{R_i + \frac{R_p}{2}} \Delta V_g = \frac{\mu \Delta V_g}{2 R_i + R_p}$$

Le tube est donc équivalent à un générateur de f.e.m. $\mu \Delta V_g$ et de résistance interne de $2 R_i$ débitant dans R_p d'où les deux schémas équivalents de la fig.61. On introduit souvent dans les relations la constante.

$$\gamma = \frac{V_{g0} + \Delta V_g}{V_{p0} - \Delta V_p} = \frac{V_{gm}}{V_d}$$

Amplificateur Cl. C. (Fig. 62).

Le montage est identique à celui de la Cl. B, mais ici $V_{g0} < V_c$ ($V_{g0} = V_c - \delta V_g$), V_c correspondant à V_{p0}. Le courant plaque ne passe que pendant $2 t_o = 2 \alpha_o / \omega_o$.

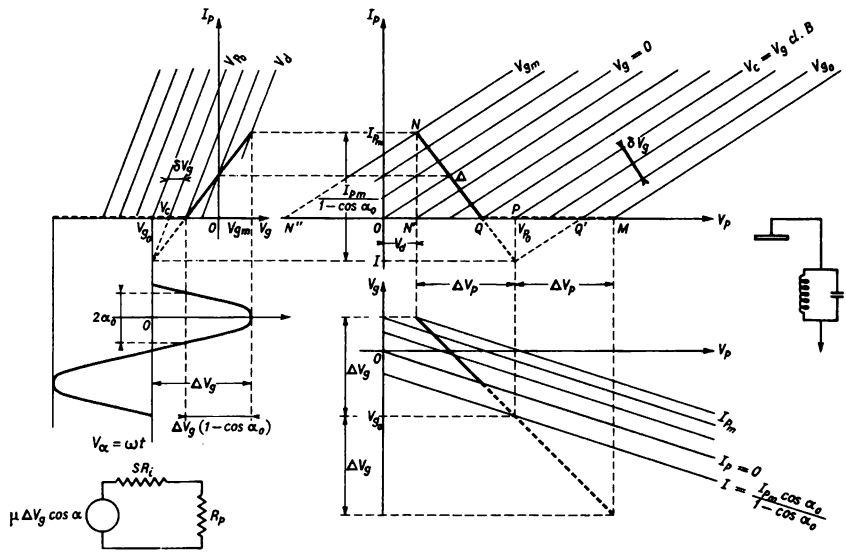


Fig. 62. - Classe C.

On peut tracer dans I_p, V_p la caractéristique dynamique et la fig.62 montre alors que $\cos \alpha_o = PQ/PN'$ en opérant sur ΔV_p et $\cos \alpha_o = Q'Q/Q'N''$ en opérant sur ΔV_g soit :

$$\cos \alpha_o = \frac{Q'Q - PQ}{Q'N'' - PN'} = \frac{Q'P}{Q'N'' - PN'} = \frac{\mu \delta V_g}{\mu \Delta V_g - \Delta V_p}$$

dans le cas des pentodes cette expression se simplifie du fait que le courant est indépendant de la tension d'anode et seulement fonction de la tension grille, on a alors :

$$\cos \alpha_o = \frac{\delta V_g}{\Delta V_g}$$

On a d'après les spectres $\overline{i_p} = \frac{I_{pm}}{\pi} \frac{\sin \alpha_o - \alpha_o \cos \alpha_o}{1 - \cos \alpha_o}$

et $P_s = V_{p0}\ \overline{i_p}$ est fourni par la source, de même :

$$\Delta i_{p_1} = \frac{I_{pm}}{\pi} \frac{\alpha_o - \sin \alpha_o \cos \alpha_o}{1 - \cos \alpha_o}$$

et $P_u = \frac{\Delta V_p \Delta i_{p1}}{2}$. La puissance dissipée sur la plaque est $P_p = P_s - P_u$.

Le rendement $\eta = P_u / P_s$ et $R_p = \frac{\Delta V_p}{\Delta i_{p1}}$. Finalement, on peut écrire :

$$P_u = \frac{\Delta V_p\ I_{pm}}{4} \cdot m \qquad \text{où} \qquad m = \frac{2}{\pi} \frac{\alpha_o - \sin \alpha_o \cos \alpha_o}{1 - \cos \alpha_o}$$

$$P_s = \frac{V_{po}\ I_{pm}}{\pi} \cdot n \qquad \text{où} \qquad n = \frac{\sin \alpha_o - \alpha_o \cos \alpha_o}{1 - \cos \alpha_o}$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} \frac{\Delta V_p}{V_{p0}} \cdot p \qquad \text{où} \qquad p = \frac{2}{\pi} \frac{\alpha_o - \sin \alpha_o \cos \alpha_o}{\sin \alpha_o - \alpha_o \cos \alpha_o}$$

$$R_p = 2 \frac{\Delta V_p}{I_{pm}} \cdot q \qquad \text{où} \qquad q = \frac{\pi}{2} \frac{1 - \cos \alpha_o}{\alpha_o - \sin \alpha_o \cos \alpha_o}$$

Ainsi, les valeurs de P_u, P_s, η et R_p sont celles de la cl. B multipliées respectivement par m, n, p et q (en cl. B, m = n = p = q = 1); on a d'ailleurs m. q = 1 quel que soit α_o. Les courbes m, n et p sont données fig. 63 en fonction de $2\alpha_o$.

Remarque. En cl. C le tube est équivalent à un générateur de f.e.m. $\mu v_g = \mu \Delta V_g \cos \omega_o t$ et de résistance interne s R_i débitant sur R_p (fig. 62) avec $s = \frac{\pi}{\alpha_o - \sin \alpha_o \cos \alpha_o}$, la courbe est donnée fig. 63. On a donc $\Delta i_{p1} = \frac{\mu \Delta V_g}{s R_i + R_p}$

Enfin, notons que généralement, on fonctionne avec α_o de l'ordre de 60 degrés.

Puissance de commande de grille.

Il y a en cl. B et C à peu près toujours débit grille. On cherche en effet à tirer le maximum du tube et on est ainsi conduit à une excitation violente de la grille. La source alternative de grille fournit alors une puissance $P_{sg} = \frac{1}{T}\int_o^T i_g \Delta V_g \cos \alpha\, dt = \frac{\Delta V_g \Delta i_{g1}}{2}$ où Δi_{g1} est l'amplitude du courant fondamental de grille. P_{sg} est la puissance de commande de grille. Il est important de remarquer que la P_{sg} étant fournie par le C.O. grille par exemple apporte à celui-ci un amortissement supplémentaire correspondant à une résistance parallèle sur le C.O. ρ telle que $\rho = \frac{\Delta V_g}{\Delta i_{g1}}$.

La puissance absorbée par le tube est par contre $P_T = \frac{1}{T}\int_o^T i_g (V_{go} + \Delta V_g \cos \alpha) dt = P_{sg} + P_o$ avec $P_o = V_{go}\, i$ où $V_{go} < 0$. La puissance P_o est ainsi fournie à la source de polarisation du

tube. La source alternative de grille fournit donc de la puissance d'une part au tube : P_T et d'autre part P_0 à la polarisation. Pratiquement, on a très sensiblement $P_{sg} \# \Delta V_g \cdot \overline{i}_g$ (en fait $\frac{\Delta V \ \Delta i_{g1}}{2}$) à quelques % près. Enfin, notons que pour un régime de fonctionnement déterminé, on peut remplacer la source de polarisation par une résistance R_g d'autopolarisation telle que $V_{g0} = - R_g \overline{i}_g$.

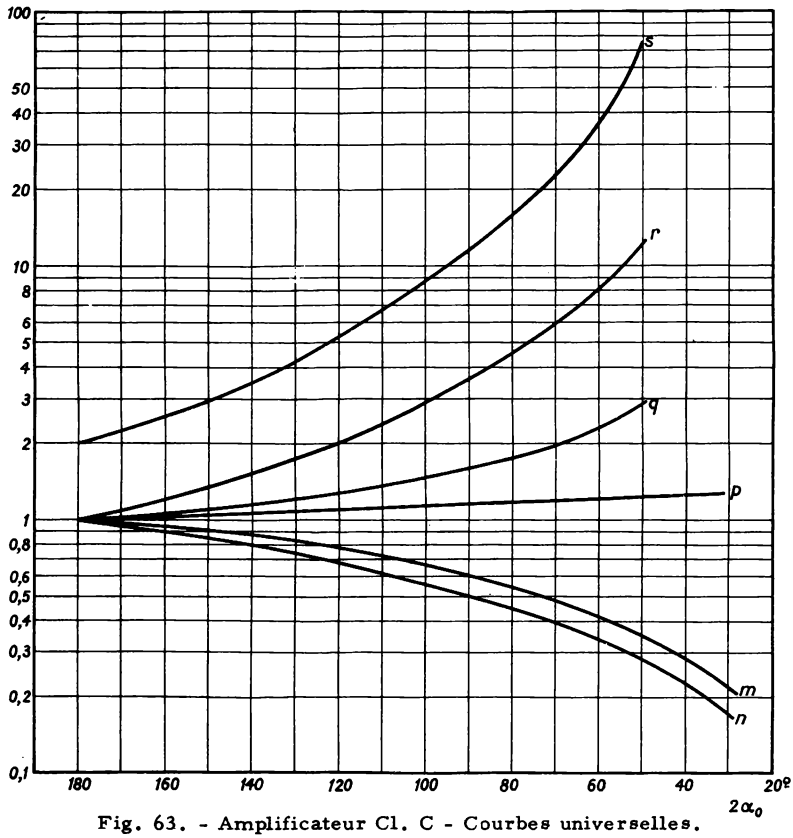


Fig. 63. - Amplificateur Cl. C - Courbes universelles.

Remarques :

1) Les relations données permettent de dégrossir le problème, pour les tubes de petite puissance, elles peuvent même suffire dans bien des cas. Pour les tubes de grosse puissance, après avoir déterminé les différents éléments à l'aide de ces diverses relations, vraies dans le réseau idéalisé seulement, on est contraint de reprendre le problème sur réseau réel en traçant les caractéristiques dynamiques point par point à partir des valeurs successives prises par v_g au cours d'un cycle et en déterminant les différentes composantes des courants par intégration graphique par exemple.

2) Le choix d'un tube de puissance s'effectue de la façon suivante : après avoir choisi le régime de fonctionnement B ou C,

on se donne un ordre de grandeur raisonnable du rendement η escompté, P_u étant connu, on a $P_s = \frac{P_u}{\eta}$ d'où $P_p = P_s - P_u = P_u \frac{1-\eta}{\eta}$ que devra pouvoir dissiper le tube. Le choix de celui-ci en découle.

Comparaison entre Cl. B. et Cl. C.

Le principal avantage de la classe C réside dans l'accroissement du rendement par rapport à celui de la cl.B. Il en résulte une diminution de la puissance dissipée sur la plaque du tube, ce qui est particulièrement intéressant, puisque l'on peut ainsi obtenir des puissances utiles notables sans être conduit à des tubes de trop forte dissipation nécessitant des refroidissements forcés (par air ou par eau).

Par contre, la cl.C présente un inconvénient par rapport à la cl.B : celui de nécessiter sur la grille une attaque de plus grande amplitude pour conserver la même valeur au courant de crête qu'en cl.B. Pour que I_{pm} soit le même, il faut que $\Delta V_g - \delta V_g = Cte$, ce qui entraîne pour l'amplitude de l'excitation grille :

$$\Delta V_{g(C)} = \Delta V_{g(B)} \frac{1}{1 - \cos \alpha_0}$$

Le facteur $r = \frac{1}{1 - \cos \alpha_0}$ est représenté sur la fig.63. Il croît très rapidement lorsque l'angle d'ouverture diminue et on est ainsi conduit à un accroissement important de la puissance de commande de grille. Les paramètres q, r et s sont liés par $s = 2qr$.

Montage symétrique Cl. A B (Fig. 64).

Dans ce montage les deux tubes T_1 et T_2 identiques sont excités en opposition de phase, de sorte que les deux tubes excités en cl.B se comportent pour la charge commune de plaques comme un amplificateur Cl.A. L'intérêt d'un tel montage est évident, si l'on compare les rendements en cl.A et en cl.B. On peut ainsi cumuler les intérêts propres aux deux modes de fonctionnement. Par ailleurs, dans le cas de la fig.64, le courant moyen parcourant le transformateur est $\overline{i_1} - \overline{i_2}$; il est nul si le montage est parfaitement symétrique, le courant moyen ne vient plus ici apporter un risque de saturation du circuit comme en cl.A. D'autre part, si pour chaque tube les amplitudes des composantes alternatives de i_p sont $\Delta i_{p1}, \Delta i_{p2}, \Delta i_{p3}...$ La résultante de ces composantes dans la charge est : $2\Delta i_{p1}, 2\Delta i_{p3}...$ du fait de l'oppo-

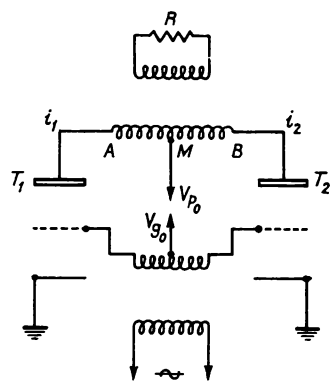


Fig. 64. - Montage Classe AB.

sition de phase des excitations. La symétrisation amène la suppression pour la charge du courant moyen et de l'harmonique deux, tandis que le fondamental est doublé. L'harmonique trois est également doublé, mais comme il est beaucoup plus faible que le second, l'inconvénient reste mineur en comparaison des avantages signalés. Dans le cas de la fig.64, si n_1 est le nombre total de spires primaires, n_2 le nombre de spires secondaires, le rapport de transformation étant $n = n_1/n_2$, comme à chaque instant, il n'y a qu'un demi-primaire qui travaille, la charge ramenée est à tout instant $R_p \left(\frac{\frac{n_1}{2}}{n_2}\right)^2 R$. Soit $R_p = \frac{1}{4} n^2 R$ pour chaque tube, alors que la charge vue entre A et B est $R_{AB} = n^2 R$ donc $R_p = \frac{1}{4} R_{AB}$. Sur chaque tube, on aura $\Delta V_p = R_p \Delta i_p$ (entre MA et MB), la droite de charge est donc déterminée pour R_p pour chaque tube. Du point de vue puissance P_u fournie à la charge, tout se passe comme si l'on avait à chaque instant un courant effectif de composante fondamentale $2 \Delta i_{p1}$ circulant dans R_p, on a donc :

$$P_u = R_p \left[2 \frac{\Delta i_{p1}}{\sqrt{2}}\right]^2 = \frac{1}{2} R_{AB} \Delta i_{p1}^2$$

pour un tube, T_1 par exemple, la puissance dissipée sur la plaque est = $P_p = V_{p0} \bar{i}_1 - P_u/2$. Un tel montage sera à utiliser lorsque la forme d'onde sera à respecter (cl.A). Certains petits moteurs de faible puissance (une dizaine de watts) possédant deux prises d'alimentation (110-220) peuvent être alimentés par exemple pour des cas particuliers (moteur Synchrone excité à une fréquence différente de celle du secteur) par un montage de ce genre.

Remarque : Condition générale d'adaptation d'une charge à une source :

Dans le cas d'une source alternative de f.e.m. E, d'impédance interne R_i, débitant sur une charge extérieure R_e, on peut chercher à obtenir le maximum de puissance utile P_u (adaptation). Dans ce cas, comme $P_u = \frac{E^2 R_e}{(R_i + R_e)^2}$ le maximum de P_u est obtenu pour $R_i = R_e$, alors $P_u = E^2/4 R_e$ (Dans le cas où l'on a affaire à des impédances complexes Z, on doit avoir $Z_e = Z_i^*$). La puissance fournie par la source étant $P_s = \frac{E^2}{R_i + R_e}$; le rendement $\eta = P_u/P_s = \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_e}}$ croît avec R_e, tandis que P_u décroît pour R_e croissant au-delà de R_i.

AMPLIFICATION DES SIGNAUX LENTEMENT VARIABLES

L'amplification des signaux (tensions ou courants) lentement variables se présente dans divers domaines (amplificateurs biologiques - mesures piezoélectriques - mesures spectroscopiques etc...) où elle pose des problèmes très particuliers du fait que

le signal à amplifier est d'un niveau généralement très faible et de fréquence quasi nulle.

Le fait que le signal soit très faible nécessite le plus souvent l'emploi d'un amplificateur de gain élevé allant parfois jusqu'à quelques 10^6 donc comportant nécessairement plusieurs étages.

L'amplificateur classique à liaison RC devient dès lors inutilisable puisqu'aussi bien la fréquence critique basse d'un tel étage ($f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$) devrait être abaissée à une valeur irréalisable pratiquement dès que f_0 doit être inférieur à une dizaine de c/s. On serait en effet conduit à une valeur exagérée de RC nécessitant soit des résistances de fuite de grille élevées, soit des capacités énormes. Dans le premier cas on est rapidement limité par le vide des tubes, dans le second cas par des éléments encombrants et de médiocre qualité, incapables d'apporter une solution au problème. La seule possibilité restante est, dès lors, de faire C infini. On est ainsi conduit tout naturellement à la liaison continue entre étages (couplage direct).

L'amplificateur continu pose un certain nombre de problèmes et principalement deux :

- les liaisons
- les instabilités de toutes natures (éléments, bruits, dérives etc...)

Liaisons.

a) amplificateur en cascade à une source et pont diviseur.

La solution la plus simple pour alimenter plusieurs étages à liaison continue consiste à établir un pont diviseur sur la haute tension générale V_{p0} de façon à pouvoir porter au repos chacune des électrodes des différents tubes au potentiel voulu. (Pl.6-fig.a) L'inconvénient principal d'une telle solution est que très rapidement V_{p0} devient prohibitif lorsque le nombre d'étages croît. Par ailleurs, les instabilités propres de V_{p0} se répercutent directement sur les diverses électrodes et en particulier entre cathodes et grilles où elles bénéficient de l'amplification. Ce montage nécessite donc une H.T. importante et fortement stabilisée.

b) amplificateur en cascade à deux sources séparées.

Le montage est celui de la pl.6 - fig.b. Il supprime l'inconvénient d'un V_{p0} élevé mais nécessite l'adjonction d'une source négative par rapport à la masse. Les groupes diviseurs R_1 R_2 et R_3 R_4 interviennent directement dans l'expression des gains de T_1 et T_2 si l'on n'a pas $R_1 + R_2 \gg R_{p1}$ et $R_3 + R_4 \gg R_{p2}$. Quelles que soient par ailleurs les valeurs de ces diviseurs par rapport à R_{p1} et R_{p2} les gains propres g_1 et g_2 des tubes sont multipliés par les facteurs $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ et $\frac{R_4}{R_3 + R_4}$ réduisant d'autant le gain de l'ensemble.

En outre si $R_1 + R_2$ et $R_3 + R_4$ sont élevés, la réponse de l'ensemble devient rapidement limitée du côté des fréquences élevées. Enfin, une grande stabilité est requise pour les groupes diviseurs et les sources.

c) couplage par tube à gaz.

Le montage est indiqué Pl.6 - fig.c. Le tube T est un tube à gaz. Comme la chute de tension aux bornes d'un tel tube peut être relativement grande (supérieure à 100 volts), la grille de T_2 se trouve ramenée à un potentiel positif voisin de la masse, d'autre part, la caractéristique d'arc de ce genre de tube (chute constante aux bornes quel que soit le débit) fait que les variations de V sont intégralement transmises à T_2 .

Le principal inconvénient d'un tel système réside dans les fluctuations propres des tubes à gaz, conséquence du phénomène de décharge interne, on a donc une liaison introduisant systématiquement un bruit supplémentaire réservant ainsi ce procédé de liaison pour les étages où le niveau du signal est déjà élevé.

d) Couplage par l'écran avec sortie cathodique.

Le montage indiqué Pl.6 - fig.d consiste à relier directement la plaque à la grille écran du tube suivant cette dernière pouvant être portée à un potentiel positif, et à insérer la charge de sortie dans la cathode. La sortie se trouve ainsi à un potentiel positif de quelques volts seulement par rapport à la masse et peut être reliée à l'étage suivant.

Instabilités.

Elles sont principalement au nombre de trois :

a) Instabilités propres des tubes et variations de leurs éléments caractéristiques (μ, p, R_i).

En ce qui concerne les variations des tubes au cours de leur vie propre, il importe dans un appareillage soigné de procéder au préalable à un vieillissement artificiel des tubes portant sur quelques centaines d'heures (100 à 200 heures).

Les variations accidentelles s'apparentent aux bruits et sont réduites par l'emploi de la contre réaction.

b) Instabilités des éléments résistants utilisés.

Ces derniers sont du type bobiné lorsque la bande de fréquences ne s'y oppose pas et quoi qu'il en soit à faible coefficient de température. La stabilité de ces éléments est d'une importance considérable étant donné le mode de liaison.

c) Instabilités des sources d'alimentation.

Les sources d'alimentation doivent être particulièrement stables, les H.T. sont dans la très grande majorité des cas à stabilisation poussée. Parfois lorsque cela est nécessaire et pratiquement possible, on emploie des accumulateurs de force capacité. Les chauffage doivent être stabilisés, la valeur de V_f influant non seulement sur le courant plaque I_p mais encore sur la pente p. Fréquemment on prend les chauffages en série sur une

haute tension stabilisée séparée à fort débit, on évite ainsi des phénomènes de ronflement. Certains montages enfin permettent d'apporter une limitation à ces diverses instabilités. Ce sont =

1) Amplificateurs compensés.

a) Compensation cathodique des ΔV_f .

Le montage est indiqué pl.6, fig.e.

Si V_f croit, I_p croit par suite R_1 $(I_{p1} + I_{p2})$ tend à augmenter et est amplifié par T_2 , modifiant V_k dans un sens tel que pour un réglage convenable de R_1 et R_2 (fonction de μ_2) on arrive à une compensation de l'effet deΔV_f .

b) Compensation des ΔV_{p0} .

Un pont pris sur la H.T. V_{p0} (pl.6 fig.e) et tel que le point milieu soit à un potentiel égal à $\frac{V_{p0}}{\mu_1}$ subira des fluctuations $\frac{\Delta V_{p0}}{\mu_1}$ qui reportées sur l'entrée, amènent une compensation des ΔV_{p0} .

2) Amplificateurs équilibrés.

Ce sont des amplificateurs montés en pont dans lesquels on cherche à réaliser la plus grande symétrie. Ils nécessitent une régulation moins poussée de V_{p0} et V_f . Ils compensent dans une certaine mesure les variations des tubes.

a) Montage en pont à équilibre parallèle.

Le schéma de principe est indiqué (pl.6, fig.f), les R_p des deux tubes sont identiques de même que les R_k. Le montage ne permet pas le couplage en cascade. Une variante (pl.6, fig.g) permet le couplage en cascade sur pont diviseur. Le gain de ce dernier montage est moitié du précédent.

b) Montage en pont à équilibre série.

Représenté pl.6, fig. h, ce montage permet le couplage en cascade sur pont diviseur commun.

Montages particuliers.

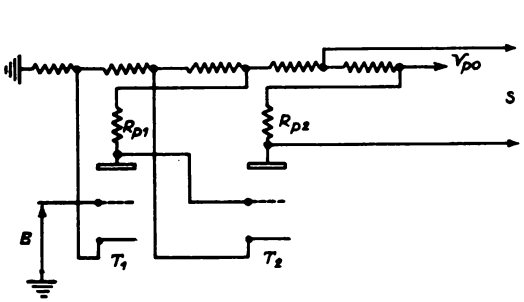
Ces montages sont évidemment en grand nombre; nous en signalerons trois particulièrement intéressants à des titres divers.

a) AMPLIFICATEUR A COUPLAGE TRANSVERSAL.

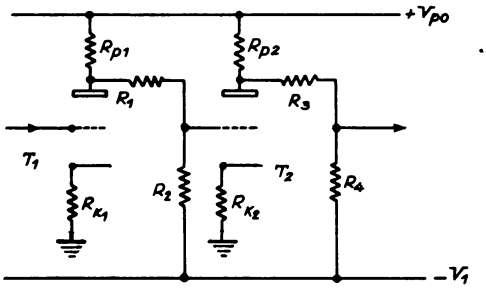
Représenté pl. 6 fig. i, ce montage est initialement réglé de sorte que $V_{k_1} = V_{k_2}$. L'entrée peut être symétrique ou non.

Si l'on suppose une entrée asymétrique entre T_1 et masse par exemple, et si un signal positif est appliqué à la grille de T_1 , V_{k_1} croît constituant un signal négatif pour T_2 et >0 pour T_3 , il en résulte sur les plaques T_2 et T_3 des signaux égaux mais en opposition de phase.

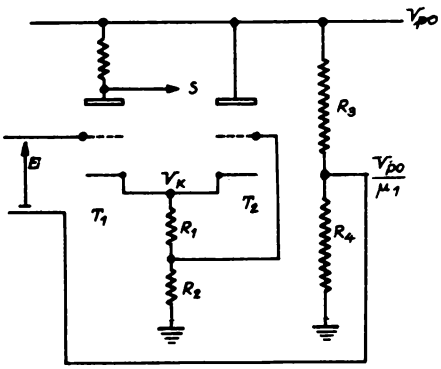
Dans le cas d'une entrée symétrique, le signal est réparti sur les grilles de T_1 et T_4 et le fonctionnement de chaque moitié est le même que précédemment. Par contre un même signal



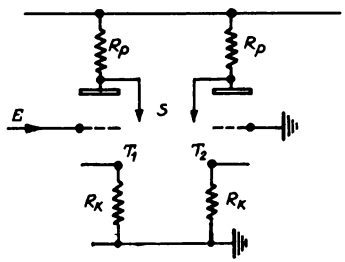
a. - Amplificateur en cascade à une source et pont diviseur.



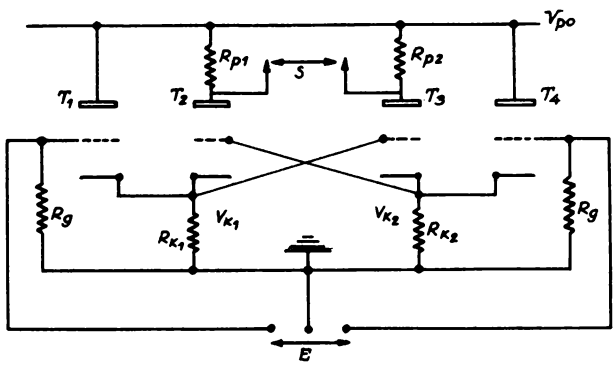
b. - Amplificateur en cascade à deux sources séparées.



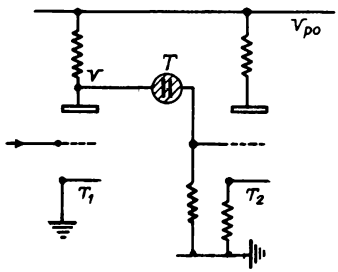
e. - Compensation cathodique des chauffages et compensation des ΔV_{po}



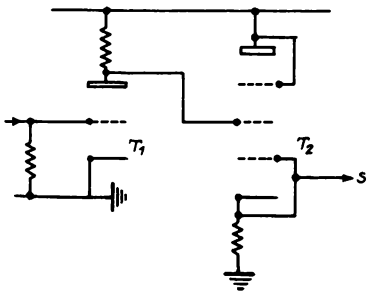
f. - Amplificateur équilibré parallèle



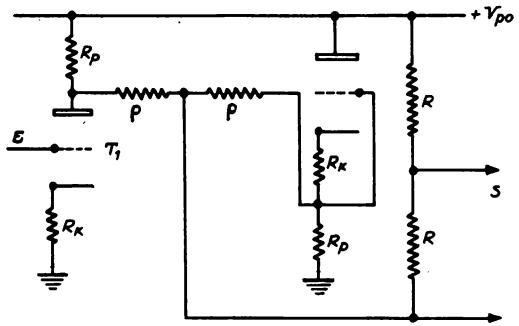
i. - Amplificateur à couplage transversal.



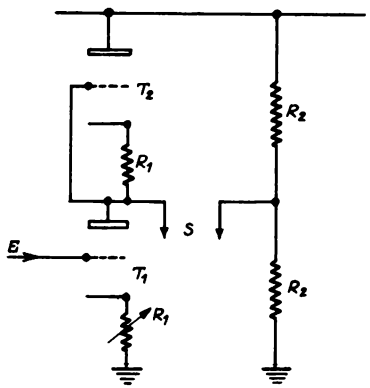
c. - Couplage par tube à gaz.



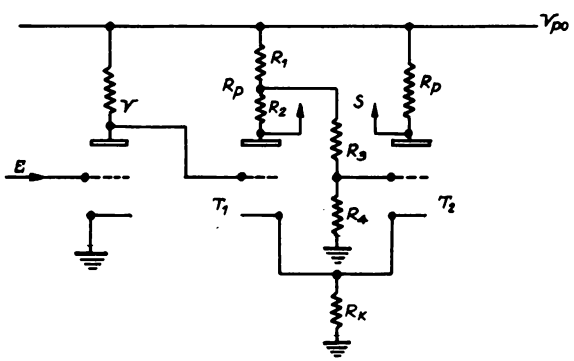
d. - Couplage par l'écran.



g. - Amplificateur équilibré parallèle (variante)



h. Amplificateur équilibré série.



j. - Circuit déphaseur.

appliqué simultanément sur les deux entrées ne donnera lieu à aucun signal de sortie, par suite tout parasite affectant le signal d'entrée sera dans le cas d'une attaque symétrique commun aux deux entrées, et par conséquent automatiquement éliminé, c'est là un gros avantage du système.

Généralement T_1 et T_4 sont à faible μ tandis que T_2 et T_3 sont à grand μ.

b) CIRCUIT DEPHASEUR - PASSAGE ASYMÉTRIQUE-SYMÉTRIQUE.

Il peut parfois être nécessaire partant d'un signal apparaissant entre masse et un point quelconque de lui faire correspondre un signal symétrique par rapport à la masse. C'est le cas par exemple de la déflexion dans un tube cathodique.

Le montage pl.6 fig.j permet ce passage. Si à E correspond un accroissement de V par exemple, V_1 diminue et est reporté après division, de façon à compenser le gain de T_1, sur la grille de T_2 identique à T_1, par suite V_2 croît d'une quantité égale à celle dont V_1 diminue. Il y a donc bien ainsi déphasage de π entre V_1 et V_2. Il importe de noter que R_k commun aux deux tubes n'introduit en fait aucune contre réaction, donc aucune diminution du gain, puisque finalement T_1 et T_2 sont attaqués en symétrique. R_k est tel que les polarisations soient convenables et R_2 R_3 R_4 permet d'une part de porter la grille de T_2 à un potentiel continu, égal à celui de la grille de T_1 et d'autre part de réaliser le diviseur de gain.

c) AMPLIFICATEUR CONTINU A TUBE SOUS ALIMENTÉ

Ce montage utilise une pentode dont les différents éléments sont normalement montés, mais dont les ordres de grandeur sont très différents des montages classiques. Principalement la charge de plaque R_p est très forte (quelques dizaines de MΩ) par suite, la plaque se trouve portée à un potentiel de quelques dizaines de volts seulement par rapport à la cathode pour une HT de valeur courante. Parallèlement l'écran est porté à un faible potentiel inférieur à V_p (une dizaine de volts par rapport à la cathode). Le courant plaque est alors très faible (inférieur au mA) parfois de l'ordre du μA.

Le tube ainsi monté voit sa pente sensiblement diminuée, sa résistance interne est par ailleurs considérablement accrue, si bien que le μ du tube est finalement augmenté dans un rapport de l'ordre de 100 par rapport au cas de l'alimentation courante.

Ce montage peut être utilisé comme premier étage où il permet de réaliser avec un seul tube un gain très élevé allant jusqu'à quelques milliers.

Pour une polarisation convenable de la grille, l'amplificateur est linéaire au voisinage du point de fonctionnement moyen pour des variations pouvant être de l'ordre du volt autour de ce point.

Le principal inconvénient du dispositif réside dans la bande passante très limitée du côté des fréquences élevées (quelques kc/s au plus) ceci étant la conséquence d'une charge de plaque élevée jointe aux capacités parasites.

DONNÉES CONCERNANT LA RÉALISATION

REMARQUES GÉNÉRALES D'ORDRE PRATIQUE

Alimentation des différentes électrodes. - Qualité des éléments.

Le montage classique d'un étage à résistance est représenté fig.65. Nous allons indiquer quelques précautions à prendre en ce qui concerne la réalisation des tensions d'alimentation des électrodes et de la qualité requise pour les différents éléments employés.

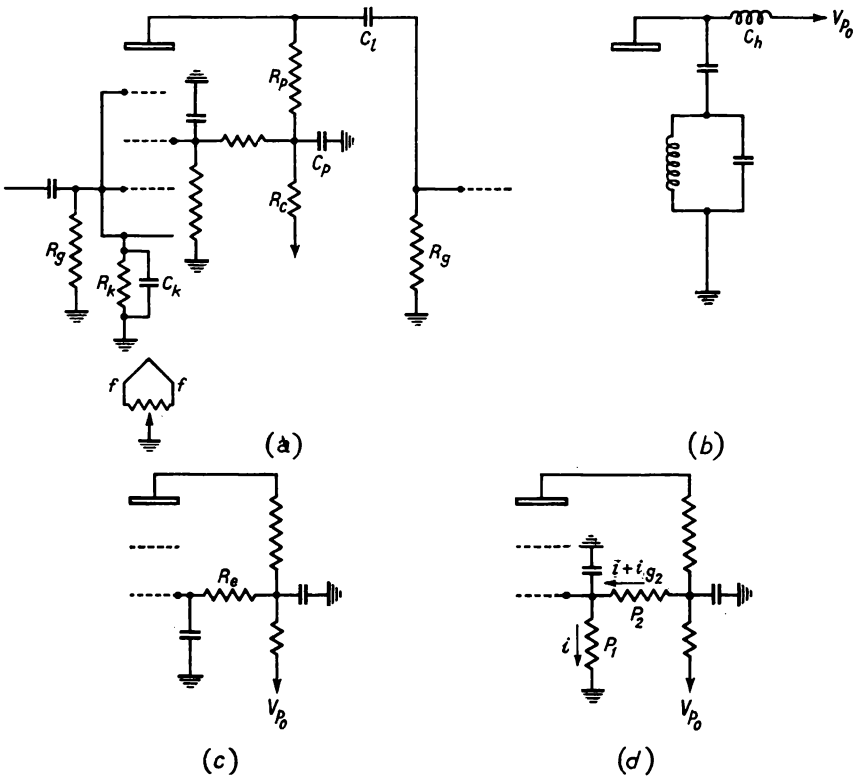


Fig. 65. - Alimentation des électrodes.

Les résistances de fuite R_g ne devront pas être trop élevées comme déjà indiqué. Dans le cas d'un étage préamplificateur, on évitera pour les attaques très faibles les résistances "carbone" qui présentent un souffle propre très important, ou bien on les prendra de dissipation assez forte. La qualité des condensateurs de liaison est très importante, leur résistance de fuite fait en effet diviseur de tension avec la résistance de la grille suivante, une fuite de C de 20 MΩ par exemple avec R_g = 1 MΩ dans le cas d'une

plaque à 100 volts, ramène sur la grille suivante une tension positive de +5 volts, la grille étant devenue positive, le fonctionnement du tube est perturbé.

Les condensateurs de découplage plaque et écran généralement au papier présentent de par leur mode de fabrication une self qui pour les fréquences élevées apporte un effet de choc contrairement à ce que l'on attend d'eux; on doublera donc les "papiers" par des "micas" en parallèle et de plus faible valeur qui pour les H.F. joueront le rôle que ne peut plus remplir le "papier". Les résistances plaque et écran devront être prévues pour pouvoir dissiper la puissance consécutive au passage du courant moyen, une résistance qui chauffe exagérément est instable et le gain de l'étage en supporte les conséquences.

En ce qui concerne les alimentations proprement dites pour les filaments il est prudent d'amener le chauffage par 2 fils et d'éviter la solution un fil et retour par la masse; dans l'alimentation bifilaire, l'un des deux fils sera après au besoin réuni à la masse. Dans certains cas d'amplificateur à faible attaque, on pourra mettre en parallèle sur les filaments un potentiomètre de faible valeur (quelques dizaines d'ohms) dont on réunira le curseur à la masse. La position du curseur sera ensuite ajustée, de façon - par équilibrage du circuit de chauffage - à éliminer le ronflement à 50 c/s apporté par la source filaments. Le retour du chauffage par la masse est en tous cas à prohiber; il apporte des ronflements très gênants dans les préamplificateurs. Une masse est en effet toujours imparfaite et le courant de chauffage est toujours important (quelques ampères), si par exemple entre le point où la cathode est réunie à la masse et le point où le pied de R_g y est réuni, la masse présente une résistance d'un centième d'ohm par exemple, un courant de 2 A développera entre cathode et grille une tension de 20 mV, si le signal d'entrée est de cet ordre de grandeur, il est évidemment inutile de poursuivre dans ces conditions. Il est toujours prudent de faire en sorte que les pieds de R_k et R_g soient réunis en commun, puis renvoyés ensemble à la masse. Dans certains cas où l'attaque de grille est très faible, on est conduit à polariser positivement de quelques dizaines de volts les filaments par rapport à la cathode pour éviter un effet de détection du circuit : filament - cathode - R_k - C_k qui apporte entre cathode et grille une tension d'attaque constituée par des pointes à 50 c/s. Enfin, dans certains préamplificateurs particulièrement sensibles, on est contraint de chauffer en continu.

Dans le cas de polarisation obtenue par l'effet de détection de R_k et C_k dans la cathode, C_k devra présenter une impédance faible vis-à-vis de R_k (au moins 10 fois plus faible) pour toutes les fréquences d'utilisation. Pour les fréquences basses, C_k ne jouant plus son rôle, un effet de contre-réaction apparaît. La polarisation par R_k C_k ne peut être employée que pour des attaques de grilles d'amplitude constante.

L'alimentation des plaques faites par R_c C_p nécessite également que R_c et C_p soient tels que R_c apporte bien un effet de choc; les mêmes proportions que pour R_k et C_k sont à respecter entre R_c et $1/C_p \omega$.

D'une façon générale, un découplage doit avoir à toute fréquence une impédance au moins 10 fois plus faible que l'impédance qu'il découple, et un choc, une impédance 10 fois plus forte que l'impédance vis-à-vis de laquelle il fait choc. Ce dernier point est à respecter dans le cas d'étage alimenté par self de choc (étage de puissance) (fig.65-b). Ce dernier procédé d'alimentation des électrodes apporte parfois des causes supplémentaires d'oscillations parasites.

Les écrans peuvent être alimentés de diverses façons, soit directement reliés à une source séparée, soit le plus généralement alimentés à partir de la H.T. de plaque. Dans ce dernier cas, on peut ou bien insérer une résistance R_e dans l'écran fig. 65-c (alimentation à tension d'écran glissante). Dans ce cas, c'est $\overline{i_{g_2}}$ qui détermine seul le potentiel d'écran à partir de V_{P0}, $\overline{i_{g_2}}$ étant fonction de v_{g_1} la tension d'écran n'est pas fixe et la pente du tube p devient fonction de l'excitation de grille. Enfin on peut alimenter l'écran à l'aide d'un pont P_1 P_2 (fig.65-d) pris sur la haute tension. La consommation du pont étant i, V_{g_2} sera d'autant plus constant que $i > \overline{i_{g_2}}$. On prend généralement i de 5 à 10 fois $\overline{i_{g_2}}$. L'écran doit être très soigneusement découplé.

Les sources de haute tension V_{P0} devront toujours avoir une résistance interne faible. Dans le cas de source résistante et de découplage défectueux, il s'opère par les sources communes à plusieurs tubes un couplage entre les étages qui apporte un effet de réaction générateur d'oscillations (couplage par les sources).

Enfin, il ne faut pas oublier que pour certaines fréquences, les éléments de découplage et de blocage peuvent si ils sont mal prévus apporter des modifications du gain et des rotations de phase du signal transmis.

LES ÉLÉMENTS R. L. C.

a. - Résistances.

Une résistance n'est jamais parfaite et comporte toujours des éléments L et C parasites (fig.66). Les deux cas extrêmes étant représentés par les résistances bobinées où L peut être important, tandis que pour les résistances au carbone, c'est C qui prédomine (entre les différents grains de carbone agglomérés avec le liant existent en effet de petites capacités dont la résultante est C_0). C'est dire que la réponse d'une résistance en fréquence peut être très différente aux basses et aux hautes suivant sa construction.

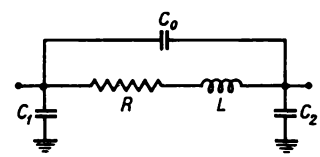


Fig. 66. - Résistance.

Pour les fréquences basses et dans le cas où l'on veut éviter au maximum le bruit apporté par une résistance, il est préférable d'utiliser des éléments bobinés dont le souffle est très inférieur aux résistances "carbone". Ces dernières sont à utiliser dans les étages où l'excitation est déjà copieuse; les résistances "carbone" sont d'ailleurs par construction des éléments rendus plus ou moins

mauvais conducteurs par l'adjonction d'un liant isolant, donc des éléments peu sûrs présentant en outre un bruit assez notable, d'autant plus important que le courant qui les parcourt est important, ceci étant dû à des arcs infimes se produisant en permanence entre les différents grains. Pour les résistances bobinées, il existe des procédés de bobinage tels que les selfs et capacités parasites soient compensées et rendues minimes. Lorsque l'élément est utilisé en H.F., un nouveau phénomène intervient : l'effet de peau, de sorte que la résistance est différente de ce qu'elle est à la fréquence zéro (R_0). A la fréquence f, on a $R_f \# R_0 (1 + \frac{y^4}{3})$ (1) avec $y = \pi r \sqrt{\frac{\mu f}{10^3 \rho}}$, où r = rayon du fil en cm, f = fréquence en c/s, ρ = résistivité en $\mu\Omega$. cm, μ = perméabilité. (1) reste valable à 1% près tant que y reste inférieur à 0,7.

On est ainsi conduit pour les fréquences élevées à utiliser des éléments résistants constitués par un simple fil très fin (quelques centièmes de mm) en manganin ou constantan. On peut alors avoir des résistances approximativement constantes jusqu'à des fréquences de l'ordre de 100 Mc/s. Les résistances ainsi constituées sont évidemment faibles. Pour réaliser des valeurs élevées, on est conduit aux résistances à couche constituées par un film conducteur de très faible épaisseur déposé sur un support isolant (dépôt métallique sur fil de quartz ou sur tube de verre, dépôt de carbone sur stéatite). On obtient ainsi des résistances de valeur élevée mais fragiles. Elles doivent en outre être largement conditionnées au point de vue dissipation, étant très sensibles à la température. Elles sont en règle générale moins stables que les résistances au carbone.

Dans le cas des résistances bobinées, on peut après avoir déjà pris les précautions de bobinage signalées plus haut pour réduire L et C, obtenir un effet de compensation entre L et C (C = capacité totale aux bornes, compte tenu de C_0, C_1 et C_2), en faisant en sorte que $R = \sqrt{\frac{L}{C}}$. Dans ce cas on procédera en premier lieu à la recherche de L, puis on effectuera la compensation en jouant sur C.

Pour un fil rectiligne, L est donné (pour $2l/r \geqslant 100$ et un effet de peau négligeable) par : $L_{\mu h} = 2.10^{-3} \left(\text{Log } \frac{2l}{r} - 1 + \frac{\mu}{4}\right) l_{cm}$, l = longueur du fil, r = rayon.

Enfin, les principaux éléments caractéristiques d'une résistance sont en dehors de sa valeur la puissance qu'elle peut dissiper et son coefficient de température.

Les caractéristiques et qualités des potentiomètres sont identiques à celles des résistances fixes avec en plus un point particulièrement délicat concernant la qualité du contact mobile qui, lorsqu'il est défectueux, est une source supplémentaire d'instabilité et de bruit (cas des potentiomètres au carbone en particulier).

Un autre point également important pour les potentiomètres est leur linéarité ou l'erreur par rapport à leur loi de variation dans le cas des potentiomètres non linéaires.

En dehors des résistances et des potentiomètres, on rencontre également des résistances bobinées ajustables dont on peut immobiliser le curseur après réglage. Ces dernières sont particulièrement utiles dans les montages comportant des réglages fins.

b. - Inductances.

De même que les résistances, les inductances ne sont jamais pure (fig.67), de sorte qu'une inductance L présente une fréquence propre f et une impédance apparente entre ses bornes $Z_a = R_a + j X_a$ où $R_a \# \frac{r}{\left[1-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2}$ et $X_a \# \frac{L\omega}{1-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2}$ son facteur de qualité étant alors : $Q_a = \frac{L_a \omega}{R_a} \# \frac{L\omega}{r}\left[1-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]$ avec $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ et $f < f_0$ (C étant constitué par C_0 C_1 et C_2). L'allure des courbes R_a X_a Q_a est indiquée fig.67. Le domaine d'utilisation en résulte : c'est la partie où Q_a est le plus élevé et à peu près constant. Au-delà de f_0, L se comporte comme une capacité avec perte. Pratiquement dans la réalisation d'un C.O. la condition générale d'accord n'imposant pas de valeur à L et C mais à L C seulement, le choix des valeurs à donner à L et C est déterminé par des considérations de ce genre. Q_a est compris entre quelques unités pour les très mauvais éléments, à quelques centaines pour les très bons. On considère parfois la quantité $r/L\omega$ également caractéristique de la qualité du bobinage, δ défini par $tg\,\delta = r/L\omega$ est l'angle de perte. Une inductance est ainsi caractérisée par sa valeur L dans son domaine d'utilisation, la valeur de Q_a dans ce domaine et sa fréquence propre f_0. Dans le cas où L n'est pas à air mais réalisé avec un matériau magnétique quelconque, les ampères-tours continus et alternatifs maxima que peut supporter la self sans être modifiée, sont également caractéristiques.

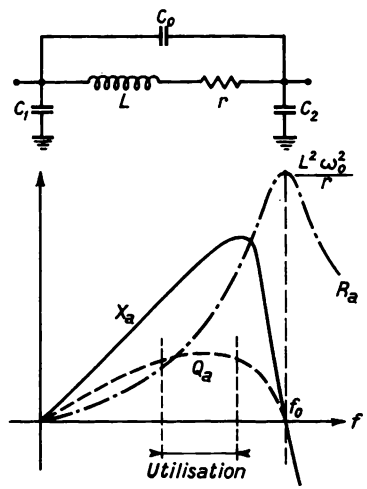


Fig. 67. - Self.

Du point de vue réalisation pratique, indiquons la réalisation courante et aisée des bobines à air à une couche (fig.68-a). Dans ce cas, $L_{\mu h} = n^2 \frac{d}{40 + 110\ l/d}$ (n nombre de spires, d en centimètres) est vrai à quelques pour cent près pour $0,1 < l/d < 1,5$.

Dans le cas de bobines à air à plusieurs couches (fig.68-b) $L_{\mu h} = \frac{n^2 d}{45 + 110\ l/d + 84\ e/d + 64\ el/d^2}$ (d en centimètres) est vrai à 1% près si $l/d > 1/2$.

Ces relations supposent la section du bobinage cylindrique; s'il n'en est pas ainsi, dans le cas où elle est polygonale, on prendra pour d le diamètre du cercle de même surface que le polygône.

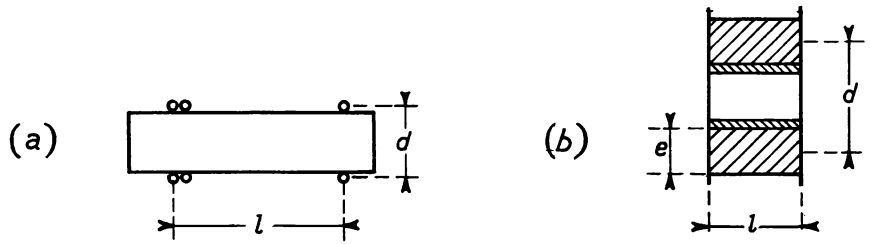


Fig. 68. - Réalisation des inductances.

On bobinera ces éléments avec du fil divisé de façon à réduire les pertes H.F.

Enfin, en ce qui concerne C_0 et la fréquence propre f_0 (ou longueur d'onde propre λ_0) dans le cas d'une bobine à une seule couche C_0 et λ_0 sont donnés par C_0 (pf) = αd_{cm} et λ_0 (m) = β l'_m, où l' est la longueur totale de fil employé, α et β étant donnés en fonction de l/d fig.69 .

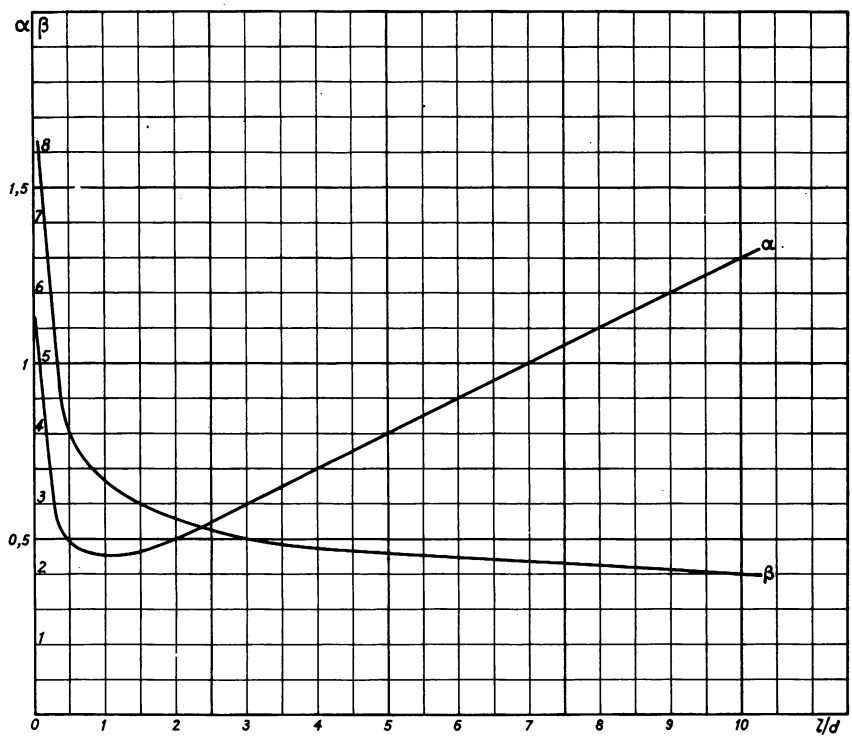


Fig. 69. - Bobine à une seule couche: Capacité répartie - Fréquence propre.

Enfin, il existe à l'heure actuelle des pots fermés permettant la réalisation de selfs importantes et surtout de très bonne qualité.

Les inductances rencontrées dans la pratique sont de grandeur et de nature très diverses, allant de la self à fer de plusieurs henrys en B F jusqu'à la self à air de quelques μh constituée par un petit nombre de spires seulement pour les H F, en passant par les pots fermés à fer divisé permettant de réaliser des selfs de quelques m h (ou même quelques dizaines de m h) à quelques dizaines de μh pour des fréquences allant jusqu'au Mc/s.

Enfin, il est intéressant de noter que pour une self, le rapport n^2/L ne dépend que du circuit magnétique, c'est-à-dire de la perméabilité du matériau, de l'entrefer éventuel et de la géométrie de l'élément. On s'efforcera donc dans les différents types de bobinage que l'on réalisera de déterminer le n^2/L du circuit; on pourra ainsi calculer très facilement par la suite le nombre de spires nécessaires pour réaliser une self déterminée avec le même type de circuit.

c. - Condensateurs.

Un condensateur se présente sous la forme du schéma équivalent de la fig.70, R représentant la fuite et les pertes diélectriques. On appelle angle de perte δ la quantité définie par $t g \delta = 1/RC\omega$, ($\neq \delta$). Elle caractérise la qualité du condensateur. L'ordre de grandeur de δ est de 10^{-4} à 10^{-6}. Les éléments C sont donc toujours de bien meilleure qualité que les inductances. Dans un C.O., c'est donc L qui déterminera la qualité du circuit et C pourra être pratiquement considéré comme parfait.

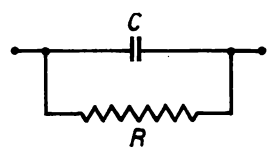


Fig. 70. - Capacité.

On réalise des condensateurs variables, fixes et ajustables. Pour les uns comme pour les autres, le paramètre important, en dehors de C, est leur tension de service U_s (et leur tension d'essai U_e, $U_e > U_s$). Il convient de se méfier des indications portées sur le corps du condensateur, le constructeur ne précisant pas toujours que le chiffre qu'il indique est plus souvent U_e que U_s. De sorte que 1500 v indiqués correspond peut-être à une tension continue de service de 250 v.

Indiquons sommairement les différents types rencontrés :

a) Condensateurs variables à air allant jusqu'à 500 pf avec une résiduelle de l'ordre de 5% du maximum.

b) Condensateurs ajustables à air (jusqu'à 150 pf) et ajustable céramique.

c) Condensateurs fixes en céramique (de quelques pf à 1000 pf) ayant un angle de perte très faible (quelques 10^{-4}) et un coefficient de température négatif. Les condensateurs fixes au mica tendent à être remplacés par les "céramiques".

d) Condensateurs fixes au papier : depuis 10^{-8} F jusqu'à

quelques μF, ils sont utilisés pour les découplages, leur angle de perte élevé (quelques 10^{-3}) n'étant pas dans ce cas gênant.

e) Condensateurs fixes au papier métallisé dont l'intérêt est d'être encore utilisable après divers claquages.

f) Enfin, condensateurs chimiques qui en règle générale sont à éviter; toutefois, ils rendent des services pour des découplages de cathodes par exemple. Ils ont l'avantage de pouvoir être de forte valeur (jusqu'à plusieurs 10^4 μF). Ils sont surtout utilisés sous basses tensions (6, 12 et 24 volts). Enfin, ils sont polarisés et l'on doit généralement les reformer lorsqu'ils ont été inutilisés pendant un certain temps.

Pour tous les éléments R, L, C indiqués, les quatre points suivants sont particulièrement importants : conditions de service, tolérances sur la valeur, coefficient de température, stabilité dans le temps. Ces deux derniers, pour une grande part caractéristiques de la qualité de l'élément utilisé, sont en dernier ressort ceux qui déterminent la qualité de l'appareil où l'élément sera incorporé.

RÉALISATION ET MISE AU POINT

La conception d'un appareillage propre à remplir des conditions déterminées, le calcul des circuits, le choix des tubes, etc... ne constituent, en fait, qu'une partie du problème. Une seconde partie que l'on peut, sans risque d'exagération, considérer comme d'égale importance est la mise au point. Elle nécessite de la part du technicien qui en est chargé des qualités qui ne s'acquièrent, comme dans toute technique, qu'avec l'expérience. Toutefois, il existe un certain nombre de points classiques à l'égard desquels on est en droit a priori et de prendre des précautions et de se méfier. Ces différents facteurs sont ce que l'on appelle au moment du projet initial les termes du second ordre; on les néglige alors nécessairement, mais on les retrouve immanquablement à la mise au point. Ce sont les plus importants d'entre eux qu'il nous reste à signaler.

En premier lieu, il faudra songer aux conditions peut-être particulières dans lesquelles l'ensemble sera appelé à fonctionner : chocs, vibrations, humidité, vapeurs acides... On en tiendra compte dans le choix des pièces détachées d'abord, puis dans la réalisation du montage (rigidité, étanchéité, vernis protecteur, imprégnation...).

Vient ensuite le câblage proprement dit de l'ensemble. Un câblage doit être par principe le plus condensé possible. On fera en sorte de disposer les supports des tubes de façon que la broche plaque d'un tube soit en regard de la broche grille du tube suivant, on raccourcira ainsi au minimum la longueur des connexions. Le chassis sera pour les H.F. un conducteur de qualité (cuivre ou laiton étamé). On se souviendra que sur un tube, le potentiel de référence est la cathode; en conséquence, les pieds des impédances de charge de toutes les électrodes seront, si besoin est, ramenées à celle-ci, puis l'ensemble renvoyé à la masse générale.

Signalons les masses souvent dangereuses que constituent les tresses métalliques, sans parler des simples fils; les masses seront réalisées au mieux avec des bandes métalliques (cuivre rouge étamé). On évitera de monter les éléments en boucle pour rechercher au contraire les montages en chaîne, les différents tubes se trouvant ainsi les uns à la suite des autres, le dernier tube de la chaîne étant alors éloigné au maximum du tube d'entrée. On évitera d'entrecroiser les connexions. Si l'une des connexions doit être allongée par impossibilité de procéder autrement, on allongera de préférence celle de plaque plutôt que celle de grille. Les connexions grille doivent être par principe, même en B F, de courte longueur. Une précaution élémentaire en ce qui concerne les chauffages consiste à torsader les deux fils d'aller et de retour ensemble. On opère ainsi une compensation des inductions de chauffage à peu de frais. Les sources seront découplées au pied même des éléments des circuits insérés dans les différentes électrodes, ces circuits étant eux-mêmes montés sur les broches mêmes du support du tube. Les fils d'amenée de tension, une fois découplés, pourront être renvoyés en un point plus éloigné du montage, leur longueur important peu, puisqu'ils ne transportent plus alors de composantes alternatives... On ne se servira jamais des broches apparemment non utilisées des tubes comme relais de connexion, celles-ci étant parfois utilisées par le constructeur du tube comme relais interne. On ne perdra pas de vue qu'un fil possède une résistance propre, une self et par rapport à ses voisins une capacité, ces fils étant reliés à des électrodes, c'est en fin de compte les capacités interélectrodes qui sont accrues. Deux fils parallèles de quelques centimètres de longueur et à quelques millimètres l'un de l'autre présentent facilement une capacité de l'ordre d'une dizaine de pf. Les selfs utilisées seront montées, de sorte que le couplage entre elles soit réduit au minimum, c'est-à-dire que l'on éloignera les éléments l'un de l'autre, éventuellement on en disposera un d'un côté et l'autre de l'autre côté du chassis, les axes des bobinages seront perpendiculaires entre eux, au besoin, on repérera le sens des enroulements de façon à disposer les deux éléments dans un sens tel que le couplage n'apporte pas de risques d'oscillations. Les transformateurs des alimentations seront éloignés le plus possible des étages d'entrée pour éviter les inductions à 50 c/s, le plus sage étant encore de réaliser les alimentations sur les chassis séparés que l'on éloignera au maximum des amplificateurs et des autres circuits dans l'assemblage définitif, cette façon de procéder évite également les échauffements excessifs des parties délicates du montage occasionnés par les sources. Enfin, un montage mis au point avec une certaine géométrie ne fonctionnera pas nécessairement aussi bien, monté différemment; il ne suffit donc pas de reproduire un appareil ayant déjà fait ses preuves pour obtenir de lui les mêmes performances. Les chocs et vibrations agissant sur les connexions et en modifiant les positions relatives tant instantanées que dans le temps, on cherchera à réaliser des connexions aussi rigides que possible, les connexions souples étant réservées aux amenées des tensions continues. On évitera également au maximum les contacts toujours plus ou moins parfaits (contacteurs) et l'on prendra le plus grand soin en ce qui concerne les soudures. L'utilisation de décapant acide est à

prohiber dans les montages délicats, une fraction de celui-ci est en effet toujours incorporée à la soudure, la rongeant à plus ou moins brève échéance apportant ainsi des causes supplémentaires d'instabilité et de bruit. Ne parlons pas évidemment des soudures simplement collées.

Ces précautions élémentaires de câblage prises, le montage mis sous tension ne fonctionnera nécessairement pas comme prévu. Indiquons les principales difficultés qui peuvent alors se présenter.

En premier lieu, avant même d'appliquer sur le montage le signal qu'il devra transmettre, il importe - après avoir effectué les réglages - de voir comment il se comporte au point de vue bruit. Si l'on constate un niveau de bruit excessif, incompatible avec le but poursuivi, on se souviendra des différentes causes signalées précédemment : résistances au carbone en particulier sur toutes les électrodes (cathode, grille, écran et plaque) du premier tube de la chaine, effet de scintillation des cathodes pour les fréquences basses, vibrations (tant mécaniques qu'acoustiques) et chocs subis par le système; à ce sujet, il convient de se méfier des tubes de faible encombrement (miniature, noval) qui présentent du point de vue rigidité mécanique des supports internes d'électrodes, des faiblesses dues à leurs dimensions et qui, en conséquence, présentent un "effet microphonique" très marqué par rapport aux tubes correspondants des anciennes séries. Ils sont en règle générale à éviter comme préamplificateurs.

En ce qui concerne les tubes utilisés pour les étages préamplificateurs, on s'assurera qu'il a été pris à leur égard les mêmes précautions que pour les oscillateurs (montage sur suspension élastique, etc...). (1)

Voisins des bruits, mais différents sont les ronflements. Ceux à 50 c/s ont déjà été signalés ainsi que leur origine : mauvaise masse, chauffage, induction des transformateurs... et d'une façon générale tous les éléments travaillant sur secteur que l'on éloignera et orientera convenablement. En ce qui concerne les inductions à 50 c/s, le plus simple est encore d'en rechercher la cause et d'éloigner au maximum les deux éléments inducteur et induit. Le blindage à 50 c/s est très difficile, pratiquement même impossible, parce qu'il conduirait à des solutions trop coûteuses. Lorsqu'on ne peut faire autrement, on blindera l'élément induit en adoptant la solution fer doux, cuivre rouge, mumétal, le premier étant à l'extérieur.

Un autre ronflement à 100 c/s, celui-ci, apparaît fréquemment; il faut en rechercher la cause dans les sources H.T. à redressement biplaque qui produisent naturellement du 100 c/s; c'est donc une question de filtrage de l'alimentation.

Un des problèmes importants de la mise au point est celui des accrochages. Ceux-ci peuvent être d'origines diverses et résultent des différentes causes possibles vues précédemment. Dans le cas où le montage comporte une contreréaction, si celui-ci

---

(1) On choisira pour ces étages des tubes ayant un I/p^2 faible.

accroche il convient de s'assurer que ce que l'on a prévu comme contreréaction n'est pas en fait une réaction (rotation de phase); au besoin on y palliera par des réseaux correcteurs. Si le montage ne possède pas a priori une telle raison d'accrochage, on pourra en rechercher la cause dans les différents points suivants : couplages par les sources, mauvaises masses, câblage non rationnel, inductions dans les étages à C.O., les capacités C_{gp} seront envisagées.

Enfin, l'une des causes également fréquente d'accrochage réside dans les tubes mêmes qui oscillent sur leurs connexions ou sur leurs éléments de blocage. Les oscillations à très haute fréquence sont généralement introduites par les selfs des connexions associées aux capacités parasites des tubes. Ces oscillations sont très souvent inobservables à l'oscillographe, mais comme toute oscillation parasite, elles sont généralement instables et ces instabilités apparaissent sur les polarisations des tubes; enfin, l'oscillation se répercute également sur les circuits de chauffage où l'on peut la détecter. Les remèdes sont dans le raccourcissement des connexions et dans une dissymétrie des connexions grille et plaque des tubes. En particulier, on cherchera à avoir pour ces deux électrodes des longueurs différentes de connexion. Si malgré ces précautions, l'oscillation subsiste, on pourra, en insérant en série dans les connexions de faibles résistances (quelques dizaines d'ohms) amortir suffisamment les circuits parasites pour empêcher l'amorçage.

D'autres oscillations à plus basse fréquence que les précédentes peuvent prendre naissance sur les éléments de blocage (selfs) et de découplage. On les éliminera en amortissant les selfs de blocage.

Ces différents points étant supposés résolus, on pourra constater alors d'autres phénomènes s'étalant dans le temps : dérives, instabilités... Les causes en sont généralement les sources qui peuvent dériver et être instables. On cherchera en particulier à s'assurer de la stabilité des polarisations des tubes et des chauffages. On songe en effet fréquemment à stabiliser les H.T. (ce qui est évidemment intéressant du point de vue niveau de ronflement et réduction de l'impédance interne), mais par contre, on néglige les chauffages qui sont le plus souvent directement obtenus à partir du secteur, sans stabilisation d'aucune sorte. Enfin, pourront également être incriminées les dérives propres des éléments utilisés dans les circuits; dans ce cas c'est l'échauffement qui en est la cause. Si il existe des impédances élevées, il conviendra de s'assurer de l'état hygrométrique des différents éléments. On vérifiera également dans le cas d'instabilité violente qu'il n'existe pas de "grille en l'air", une grille dont le potentiel n'est pas défini par suite de l'oubli d'une soudure ou d'une coupure de connexion apporte des instabilités, voire des phénomènes de relaxation par suite des charges qu'elle prend, coupant ainsi le faisceau, puis permettant le rétablissement de celui-ci en se déchargeant. On s'assurera enfin que le secteur ne véhicule pas de parasites brefs et violents produits en un point peut-être éloigné.

Lorsque l'appareil sera terminé et complètement mis au point, on n'oubliera pas d'en relever le schéma réel, compte tenu de toutes les modifications apportées à la mise au point; on notera pour chaque étage les différentes tensions et courants tant en statique qu'en dynamique; pour les tensions on notera au besoin que le relevé a été fait avec un appareil ayant n ohm/volt. Les valeurs des éléments employés, leur constitution (condensateur, papier ou mica, résistance bobinée ou carbone...), leur tolérance, la dissipation pour les résistances, la tension de service pour les condensateurs... tous ces éléments seront notés dans une nomenclature. Pour les étages ayant un fonctionnement ou délicat, ou particulier, on précisera au besoin sur le schéma un ou deux points capitaux.

Schéma et nomenclature sont certainement les deux questions les plus fastidieuses dont on ait à s'occuper au cours d'une réalisation; elles sont souvent négligées ou même omises; c'est pensons-nous à tort, car tôt ou tard, l'appareil pourra par la suite présenter des défaillances, ou devra être reproduit, c'est alors qu'apparaîtra tout l'intérêt de ces deux derniers points.

BIBLIOGRAPHIE

Techniques de l'Ingénieur : Volumes Electroniques I et II (Techniques de l'Ingénieur, Paris)

Radio Engineers' Handbook - Terman. (Mc Graw-Hill, Editeur)

INDEX DU VOLUME I

Absorption atmosphérique 243
Absorption (cuve d') 374
Absorption de l'infra-rouge 362
Absorption de l'ultra-violet 364
Absorption des radiations ...303 - 362
Abrasifs ....61 - 62
Accélérographes ..... 439 - 450
Aciers spéciaux 55
Alignement (de lentilles) 294
Alliages légers 64
Alternateur 165
Aluminium 64
Aluminium-chrome .....146 - 151
Aluminium-nickel 187
Amorçage (pression d') ..... 95 - 101
Amortisseurs à air 46
Amortisseurs à huile 45
Amortisseurs par courants de Foucault 45
Amplificateurs (classes).... 588 - 599
Amplificateur à courant continu ..... 488 - 650
Amplificateurs mécaniques 33
Amplification de puissance.. 599 - 644
Amplification de tension..... 588
Ampoule 73
Antimoine (cellules à) 386
Apport de verre 83
Arc (four à) 161
Arc (soudure à l') 64
Arc à circulation de gaz rare 325
Arc à mercure 318
Arc entre électrodes dans le vide. 318
Arc entre électrodes de charbon.. 315
Arc entre électrodes métalliques . 317
Arc au fer 317
Articulations à lame flexible 31
Aspiration (sondes à) 211
Astable 636
Auer (manchon) 308
Autogène (soudure) 64
Axe de pivotage 13
Axe instantané de rotation 10
Azote 353

Baguettes (four à) 152
Ballon 75
Banc d'optique 27
Bande de fréquence 548
Bande passante ..... 552 - 568 - 605
Barillet de miroir 9
Barres cylindriques calibrées.... 11
Bistable 638
Boite à noyaux 24
Bossages ..... 24 - 28
Brasure 63
Broutage 54
Bruit de fond ..... 384 - 400 - 632
Brûleurs 175

Câble retardateur 469
Calcul de fours électriques 148
Calorifuges 141
Camphre 85
Canalisations de vide 93
Capacité ..... 341 - 442 - 592
Capsule de Marey 429
Caractéristiques de la décharge .. 312
Caractéristiques des redresseurs. 504
Caractéristiques mécaniques 48
Carbone 156
Carborundum ..... 62 - 151 - 153
Carbures de tungstène, tantale, titane 55
Cathodes 507
Cathodiques (four à rayons)..... 170
Cellules à couche d'arrêt 394
Cellules à gaz 388
Cellules aux métaux alcalins..... 385
Cellules photo-émissives à vide .. 384
Chaine (entrainement par) 35

Chalumeau ..... 69 - 176
Chalumeau à hydrogène atomique . 183
Charbon granuleux (four à) 160
Chariot ..... 10 - 16
Chassis de moulage 22
Chemin de roulement 14
Chrome (alliages de) ..... 144 - 151
Chronographe 456
Cinematographie 462
Circuits à accords décalés 572
Circuits CR ..... 554 - 606
Circuits oscillants 559
Clapet 98
Coefficient de température 234
Coesium (cellules à) 385
Collimateur ..... 287 - 289
Combustion (température de)..... 172
Compte-temps 455
Condensateur ..... 525 - 663
Cône (rotation par) 13
Congés 22
Constante de temps ..... 497 - 553
Construction de systèmes optiques 265
Contraste ..... 276 - 286
Contre - réaction 611
Copper-clad (soudure verre)..... 80
Coulissage de tubes..... 29
Coupe du verre..... 70
Couple thermo-électrique 185
Courant d'obscurité ..... 390 - 407
Courbure d'un tube 77
Courroies 35
Couteau ..... 18 - 32
Couteau à verre 70
Crapaudine 7
Crémaillère 38
Crique 27
Cuivre (soudure verre)..... 80

Débit d'une pompe ..... 91 - 94
Décharge (redresseurs à)..... 510
Décharge (stabilisateurs à) 492
Décharge dans les gaz 312
Décharge instantanée 339
Décibel..... 552
Découpage d'un disque de verre .. 85
Déformation des pièces..... 50
Dégazage (four à)..... 121
Dégazage de l'huile 96
Dégazage des pièces 120
Dégraissage des rodages 83
Denture 37
Dépouille 22
Dérivation électrique..... 441 - 556
Détection ..... 577 - 585
Dilatables (fils) 201
Dilatation des verres 72
Dilatomètre Chévenard..... 8 - 18
Diode ..... 507 - 575
Dispersion ..... 235 - 240
Distorsion ..... 601 - 610
Division de fréquence 630
Dualité (principe de) 573
Dynamomètres 450

Echauffement 279
Eclairage ..... 275 - 428
Ecrêtage ..... 584 - 643
Electrolyse de l'eau 352
Electrolyse du verre 358
Electromètres 408
Emissif (pouvoir)..... 151
Emission secondaire 389
Energie des radiations..... 301
Engrenages coniques 40
Engrenages droits 36
Engrenages hélicoïdaux 38
Enregistrement automatique 432
Enregistrement des phénomènes mécaniques 466

Enregistrement des températures élevées 199
Enregistrement lent 422
Enregistrement photographique. 426-462
Enregistrement rapide 462
Entretenues (ondes) 328
Equerre optique 260
Equilibrage dynamique 44
Equilibrage statique 43
Essence de térébenthine 85
Et. (montage) 639
Etalonnage d'un couple 192
Etalonnage d'un pyromètre 194
Etincelles (générateur H.F. à) 165 - 344
Etincelles condensées 463
Etouffeur de vibrations 46
Evasements ..... 70 - 78
Excentricité 42
Explosion de fils 340
Extensomètres 445

Fêlures (réparation des) 83
Ferro-nickel (soudure verre) 80
Fidélité 3
Filament 309
Film 425
Filtre de Christiansen 369
Filtres ..... 367 - 386 - 14 - 579
Flamme ..... 172 - 207 - 215 - 336
Flexion (réglage par) 30
Fluorescence 285
Fluorine 239
Flux décapant 65
Focale (isolation) 370
Fonderie 21
Four à arc rayonnant 161
Four à baguettes de carborundum. 153
Four à charbon granuleux 160
Four à concentration de rayonnement 171
Four à flammes 172
Four à gaz 176
Four à hélice de graphite 158
Four à induction 162
Four à rayons cathodiques 170
Four à sole conductrice 161
Four à tiges de graphite 154
Four à tube de carbone 156
Four à tube métallique 159
Four avec tiges noyées dans la substance 162
Fours électriques 141
Fours électriques à résistances .. 144
Fraisage 57
Fraises de forme 37
Fréquence ..... 301 - 548
Fréquence propre.... 421 - 423 - 432
Fréquence propre d'oscillation ... 51
Fuites des appareils à vide . 110 - 111

Galvanomètres 407
Gaz rares 352
Geissler (tube de) 330
Globar (lampe) 311
Graisse à robinets 108
Graphite ..... 151 - 154 - 158
Grossissement 271

Harmoniques ..... 515 - 542
Haute fréquence 328
Haute fréquence (four à) 162
Hélicoïdal (mouvement) 15
Huile de pompe à vide ..... 96 - 103
Hydrogène (introduction d') 351
Hydrogène (lampe à) 331
Hydrogène atomique (chalumeau à) 183

Immersion 284
Immersion (liquides à) 245
Impédance 593
Impulsion 538
Incandescence 306
Indice de réfraction .. 233 - 235 - 240
Inductances ..... 526 - 661
Inductances à noyau mobile 483
Inductances à saturation 484
Induction ..... 451 - 529
Induction (four à) 162

Inertie ..... 397 - 402
Inertie calorifique 204
Infrarouge .... 238 - 244 - 308 - 323
Inscripteurs 426
Instruments (usages des) 275
Instruments de photographie 273 - 296
Instruments de projection 296
Instruments visuels 270
Intégration électrique ..... 441 - 641
Isolants 49
Inversion de raie spectrale 213

Jauge d'ionisation 128
Jauge de Mac Léod 125
Jauge de Pirani 127
Jeu 42
Joint à rotule 19
Joints élastiques 116
Joints plastiques 113
Joints refroidis 115

Liquides (résistances) 478
Lumière du jour 377

Mâcles 248
Magnéto-striction 440
Manchons d'accouplement 34
Manographes ..... 439 - 441 - 454
Manomètre à fibre 130
Manomètre à mercure 122
Manomètre de Knudsen 130
Mastics, masticages 109
Mercure (distillation du) 105
Mercure (lavage du) 106
Mercure (pompe à) 100
Mercure (redresseurs à) 512
Mercure (tension de vapeur du)... 91
Mercure (trompe à) 105
Métalliques (appareils à vide) ... 111
Métaux (caractéristiques des) ... 48
Microscope 283
Millivoltmètre 188
Mise au point 279
Module 37
Modulée (lumière) 335
Molydbène ..... 147 - 151
Molybdène (soudure verre) 80
Monochromateurs 367
Monostable 638
Moulage 21
Multiplicateur d'électrons 389
Multiplicateur de fréquence 628

Nernst (lampe de) 309
Nettoyage des surfaces optiques .. 257
Nichrome ..... 144 - 151
Noir de fumée ..... 142 - 156 - 422

Objectifs 261
Ondes entretenues 328
Oscillateurs 616
Oscillographe cathodique 468 - 602 - 609
Oscillographes électromagnétiques ..... 432 - 435
Oscillographes piézo-électriques . 431
Osmo-régulateur 351
Ou (montage) 639
Outils au diamant 56
Oxydes réfractaires 142
Oxygène 353

Palettes (pompe à) 95
Papier paraffiné 424
Papier photographique 427
Peau (épaisseur de) 163
Pentode ..... 586. - 604
Perçage 59
Photo-conductrices (cellules) 396
Photo-électriques (cellules) 453
Photographie ... 273 - 296 - 426 - 462
Phototransistors 407
Pièces tournantes 42
Pièges à condensation 90
Piézo-électricité ..... 431 - 439
Platine ..... 151 - 186
Pointolite (lampe) 314
Polaroïdes 246
Pompes à vide à huile 102

Pompes à vide à mercure 100
Pompes à vide à palette 95
Pompe à vide Holweck 104
Pompe de Toepler 350
Ponctuelle (source de lumière)... 335
Potassium (cellules à) 385
Potentiomètres ..... 189 - 411 - 453 - 477 - 660
Précision 3
Préchauffage 177
Pression d'amorçage 95
Pression limite 89
Prismes 260
Projet d'appareil 20
Purgeur à mercure 126
Pyromètre optique 193

Quartz ..... 238 - 364 - 439 - 622

Rabotage 53
Raie spectrale 301
Rainure ..... 10 - 14
Rayonnement (four à concentration de) 171
Rayonnement (lois du) 304
Rayonnement (transmission par).. 139
Rayonnement total 197
Rayons restants 371
Réaction 611
Rectification 59
Récupérateur 178
Redressement ..... 498 - 577
Redresseurs à mercure 512
Redresseurs secs 503
Réflexion (facteur de) 251
Réglage d'un système optique ..... 290 - 294 - 296
Règle optique 297
Régulateurs ..... 476 - 482
Régulation des courants 495
Régulation des températures 201
Régulation des tensions 475
Relais électro-lumineux 412
Rendement quantique d'une cellule 387
Résistances (fours à) 144
Résistances (jauges à) 443
Résistances auto-régulatrices 493 - 495
Résistances de réglage ..... 150 - 477
Résolution 270
Résonance (radiations de) 368
Réticule 288
Retrait 21
Robinets à aiguille 120
Robinets coniques ..... 108 - 118
Rodages ..... 61 - 85 - 113
Rotation (mouvement de) 13
Roulement à billes ..... 14 - 42

Salicylate de sodium 387
Saturation (d'une cellule photo-électrique) ..... 385 - 409
Saturation magnétique 484
Seignette (sel de) 440
Sélectivité ..... 552 - 562 - 615
Sélénium (cellules à) 394
Sélénium (redresseurs à) 506
Self-induction 448
Sel gemme 239
Sensibilité 3
Sensibilité spectrale 383 à 387 - 394 à 402
Serpentin de verre 77
Silice ..... 142 - 239
Silice (glace de) 84
Silice (travail de la) 84
Socle 27
Sodium (lampe à) 328
Solutions absorbantes 375
Soudures ..... 62 - 75
Soudure électrique 360
Soudures internes 78
Soudures latérales 75
Soudures sur place 82
Soudures verre-métal 80
Soufflage du verre 72
Stabilovolt 492
Stellite 56
Stroboscopie 466
Supports anti-vibrateurs 46
Suspension 32

Taille d'engrenages 37
Température de brillance .. 211 - 305
Température de combustion 172
Température de couleur ... 212 - 307
Températures repères 186
Température vraie ..... 196 - 211
Temps (enregistrement du) 455
Temps de réponse ..... 402 - 553
Tension de vapeur 91
Tension (haute) 327
Tétrode 604
Tiges chauffantes (four à)..... 152
Tiges de graphite (four à)..... 154
Torsiographe 442
Tournantes (électrodes) 345
Traitement thermique 49
Transformateurs 481
Transmission de la chaleur 138
Transmission de mouvement dans le vide 117
Transparence 237
Trépied ..... 9 - 27
Triode 586
Trompe à eau 97
Trompe à mercure 105
Trompe soufflante 98
Trou-plan 13
Trousser (planche à) 26
Trou-trait-plan ..... 7 - 18
Tube à essais 74
Tubes chauffants (four à) 156
Tubes coulissants ..... 13 - 29
Tubes rainés 145
Tubulaires (fours) ..... 144 - 156
Tungstène ..... 151 - 307
Tungstène (raccord silice)..... 84
Tungstène (soudure verre)..... 81

Ultra-violet (cellules pour l') 387

Vannes à mercure 107
Vannes mécaniques 119
Verre (installations en) 106
Verres de lunetterie 259
Verres d'optique 235
Verres spéciaux 71
Vibrographe 442
Vides (fours à) ..... 158 - 168
Vis différentielle 30
Vis et écrous 15
Vis tangente 40
Vitesse de coupe 56
Vitesse de pompage 91
Voyant à décharge .... 81 - 111 - 124

Composition - Impression
par les Procédés
" TYME - OFFSET "

ACHEVÉ D'IMPRIMER
LE 30 SEPTEMBRE 1955
SUR LES PRESSES DE
J. & R. SENNAC
54, Fbg Montmartre, 54
PARIS (9e)

N° d'Imprimeur 5.893